

# Postupci završne obrade dijelova

---

**Labura, Krešimir**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2015**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:295079>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-23**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

# **ZAVRŠNI RAD**

**POSTUPCI ZAVRŠNE OBRADJE DIJELOVA**

**Krešimir Labura**

Karlovac, 2015.

**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**

**STRUČNI STUDIJ STROJARSTVO**

PROIZVODNO STROJARSTVO

**ZAVRŠNI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Damir Ciglar

Student:

Krešimir Labura

Karlovac, 2015.



## VELEUČILIŠTE U KARLOVCU STRUČNI STUDIJ STROJARSTVO

Usmjerenje: PROIZVODNO STROJARSTVO

Karlovac, 08.04.2015.

### ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: KREŠIMIR LABURA

Matični broj: 0110611074

Naslov: **POSTUPCI ZAVRŠNE OBRADJE DIJELOVA**

Opis zadatka:

Ono što se može zamijetiti u današnjoj industrijskoj proizvodnji, jest opća težnja ka kvalitetnoj, brznoj i jeftinoj proizvodnji. Ako je količina materijala koja se mora odvojiti s obratka velika, u principu se koriste strojevi i postupci obrade odvajanjem čestica s alatima definirane rezne geometrije. Nasuprot tome, strojevi i postupci završne obrade se uglavnom koriste ako se traži visoka kvaliteta i preciznost kod obrade dijelova. To međutim danas više nije načelo suvremene industrijske proizvodnje jer granica primjene pojedinih postupaka obrade postaje neodređena.

U radu je potrebno dati literaturni pregled i karakteristike postupaka završne obrade dijelova, s posebnim osvrtom na suvremene postupke brušenja, kojima namjena nije više samo završna obrada, odnosno dobijanje kvalitete, već i ostvarivanje visoke proizvodnosti.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

...23.01.2015...

.....2015.....

.....2015.....

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

Prof. dr. sc. Damir Ciglar

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam Završni rad izradio samostalno, služeći se znanjem stečenim tijekom studija i koristeći navedenu literaturu.

Zahvaljujem svojem voditelju i mentoru prof. dr. sc. Damiru Ciglaru na stručnoj pomoći, savjetima i konstruktivnim komentarima pri izradi ovog završnog rada.

Posebno se zahvaljujem svojim prijateljima i obitelji na svojoj pruženoj potpori i pomoći tijekom studija.

Zahvaljujem se svojoj djevojci Sanji na potpori kroz cijelo vrijeme.

Krešimir Labura

# SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	I
SAŽETAK .....	III
SUMMARY .....	IV
1 UVOD.....	1
2 BRUŠENJE .....	3
3 POSTUPCI BRUŠENJA S POVEĆANOM PROIZVODNOŠĆU .....	6
3.1 DUBOKO BRUŠENJE .....	7
3.2 BRUŠENJE S KONTINUIRANIM PROFILIRANJEM.....	10
3.3 DUBOKO BRUŠENJE S KONTINUIRANIM PROFILIRANJEM BRUSA .....	12
3.4 VISOKOBRZINSKO BRUŠENJE SA CBN ili PCD BRUSOM .....	17
3.5 VISOKOUČINSKO BRUŠENJE .....	24
3.6 ELEKTROKEMIJSKO BRUŠENJE.....	26
3.7 ELEKTROEROZIJSKO BRUŠENJE .....	30
4 SUPERFINIŠ .....	32
5 HONANJE .....	35
6 LEPANJE .....	39
7 ZAKLJUČAK .....	46
8 LITERATURA.....	48

## POPIS SLIKA

Slika 1. Osnovni elementi obradnog sustava [2].....	1
Slika 2. Podjela postupaka obrade odvajanjem [3].....	2
Slika 3. Rezna površina brusa [4].....	3
Slika 4. Najčešći postupci obrade brušenjem [4].....	5
Slika 5. Usporedba klasičnog brušenja sa dubokim.....	8
Slika 6. Primjer visokoporoznog brusa kod dubokog brušenja [9].....	9
Slika 7. Primjer postupka CD brušenja iz industrijske proizvodnje [10].....	11
Slika 8. Alati za obradu rezne površine brusne ploče [13].....	11
Slika 9. Idejni princip izvođenja CDCF brušenja [11].....	13
Slika 10. Sustav kontinuiranog profiliranja kod CDCF brušenja [12].....	13
Slika 11. Neprekinuta obrada rezne površine brusa [11].....	14
Slika 12. Neprekinuta obrada rezne površine brusa u praksi [11].....	14
Slika 13. Obrada rezne površine brusa s nadzorom snage vretena [11].....	15
Slika 14. Obrada dugih cilindričnih obratka [11].....	15
Slika 15. Vrijednosti tvrdoće brusnih materijala [14].....	17
Slika 16. Usporedba PCD/CBN brusnih materijala s korundom [14].....	18
Slika 17. Struktura i izgled brusa s keramičkim vezivom [14].....	19
Slika 18. Struktura i izgled brusa s vezivom od smole [14].....	19
Slika 19. Struktura i izgled brusa dobivenog galvaniziranjem [14].....	20
Slika 20. Pojava mikropukotina na željezničkim tračnicama [15].....	22
Slika 21. Obrada gornje površine tračnica klasičnim brušenjem [15].....	22
Slika 22. Obrada tračnica visokobrzinskim brušenjem [15].....	23
Slika 23. Izgled stroja za brušenje željezničkih tračnica [15].....	23
Slika 24. Elektrokemijsko brušenje [17].....	27
Slika 25. Obradak obrađen klasičnim brušenjem i ECG-om [19].....	29
Slika 26. Prikaz elektroerozijskog postupka brušenja [26].....	30
Slika 27. Postupak obrade superfinišem [27].....	32
Slika 28. Izgled površine nakon obrade superfinišem [21].....	33
Slika 29. Superfiniš [25].....	33
Slika 30. Izgled i smjer gibanja alata pri honanju [21].....	35
Slika 31. Primjer kruto i elastično spojenih segmenta za honanje na trup alata [21].....	36
Slika 32. Segmenti (kamenje) za honanje [21].....	37

Slika 33. Honanje hidrauličkog cilindra [21] .....	38
Slika 34. Površina košuljice cilindra prije i poslije honanja [23].....	38
Slika 35. Postupak lepanja [24] .....	39
Slika 36. Ploča s gnijezdima za prihvat obradaka pri lepanju [21] .....	40
Slika 37. Ploče za lepanje sa različitim utorima [21] .....	41
Slika 38. Prisilno lepanje [28].....	42
Slika 39. Lepanje uranjanjem [28] .....	42
Slika 40. Lepanje mlazom [28].....	43
Slika 41. Lepanjem glađenjem (poliranje) [28].....	43
Slika 42. Stroj za lepanje s četiri gnijezda za obratke [21] .....	44
Slika 43. Stroj za lepanje sa šest gnijezda za obratke [21].....	45



## **SAŽETAK**

Završnim radom prikazan je literaturni uvid u završne postupke obrade odvajanjem čestica s posebnim naglaskom na postupke odvajanja čestica s nedefiniranom reznom oštricom. U završne postupke s nedefiniranom reznom oštricom ubrajaju se: brušenje, superfiniš, honanje i lepanje.

Glavnina rada obrađuje suvremene postupke brušenja orijentirane na ostvarivanje povećane proizvodnosti, što je karakteristika suvremenih postupaka. Pod postupcima brušenja s povećanom proizvodnošću obrađeni su slijedeći postupci: duboko brušenje, brušenje s kontinuiranim profiliranjem brusa, duboko brušenje s kontinuiranim profiliranjem brusa, visokobrzinsko brušenje sa superabrazivnim brusevima (CBN ili PCD), visokoučinsko brušenje, elektrokemijsko brušenje i elektroerozijsko brušenje.

Cilj završnog rada je zorno prikazati karakteristike i mogućnosti pojedinih postupaka završne obrade odvajanja čestica s nedefiniranom oštricom, te njihovu primjenu u današnjoj suvremenoj industrijskoj proizvodnji.

## **SUMMARY**

In these thesis will be shown literature review of final surface processes by material removal, especially the processes of material removal without geometric defined blades.

Grinding, Superfinishing, Honing and Lapping are consider to be processes that allow precise and surface finish.

Every four of previously named processes will be explained in this thesis, but main focus is kept on modern griding processes with increased productivity.

Modern grinding processes include: „Deep Feed Grinding“, „Countinuous Dressing Grinding“, „Deep Feed Contiuous Dressing Grinding“, „High Efficiency Grinding“, „Electrochemical Grinding“, „Electro Discharge Grinding“:

The main goal of this thesis is to present characteristics and possibilities of all named processes and their practical usage in industry.

# 1 UVOD

Život današnjeg suvremenog čovjeka je uvelike raznovrsniji nego što je bio u ne tako davnoj prošlosti. Upravo taj široki spektar djelatnosti je posljedica jednog vrlo dinamičnog razvoja stvari koje okružuju čovjeka i njegovu okolinu. No, da bi do razvitka uopće došlo treba postojati proces, točnije potreba, ideja, početak, realizacija, proizvodnja.

Svakodnevnim aktivnostima čovjek kao pojedinac ili dio društva okružen je mnogim granama djelatnosti, ali najveći utjecaj na razvoj ima privredna grana pod nazivom industrijska proizvodnja. Ona donosi kapital i omogućila je veliki iskorak u području formiranja trenutno najraširenijeg postupka obrade dijelova, obrade odvajanjem čestica. Nadalje, ispred industrijske proizvodnje postavljeni su iznimno visoki zahtjevi poput: smanjenja vremena (proizvodnje, isporuke), povećanja proizvodnosti (veća iskoristivost strojeva i opreme), više kvalitete, očuvanje okoliša i mnogi drugi. [1]

Obrada odvajanjem čestica podijeljena je u mnoštvo postupaka koji imaju zajednički cilj: odstranjujući česticu do prethodno definiranih mjera, početni volumen dovesti do formiranja konačnog izratka. Takav proces dobivanja izratka iz sirovine rezultat je međusobnog sudjelovanja najvažnijih dijelova proizvodnog procesa kao što su: alatni stroj, rezni alat, obradak. Slikoviti primjer međusobnog sudjelovanja prikazan je slikom 1.



Slika 1. Osnovni elementi obradnog sustava [2]

Prema definiciji, obrada odvajanjem čestica je promjena obratka nastala uslijed mehaničkog odvajanja čestica materijala koja se može izvesti ručnim alatom ili strojno, na alatnom stroju. Odvajanje se može vršiti alatom koji ima jednu ili više reznih oštrica, s time da alat i obradak, uz prisustvo energije, moraju imati određene vrste gibanja koja omogućuju cijeli postupak.

Prednosti poput obrade geometrijski složenih oblika, obrada teškoobradivih materijala, ekonomičnost obrade malih serija, omogućile su da u 1990-tim godinama čak 70% alatnih strojeva se koristi u svrhu obrade odvajanjem, a tek ostatak u svrhe deformiranja.

Nadalje, da bi postupak odvajanja iz dana u dan opravdano ostvarivao svoju rasprostranjenost u uporabi, bilo je nužno prilagođavati se zahtjevima oblika obratka što je za rezultat imalo nastanak podjele postupaka odvajanjem kakvu danas poznajemo, koja je zorno prikazana na slici 2.

<b>Obrada odvajanjem čestica</b> (odvajanje materijala od nekog tijela ili presjecanje tijela)			
<b>RAZDVAJANJE</b> - Odrezivanje - Odsjecanje	<b>ODVAJANJE ALATOM S GEOMETRIJSKI DEFINIRANOM OŠTRICOM (OBRADA REZANJEM)</b>	<b>ODVAJANJE ALATOM S GEOMETRIJSKIH NEDEFINIRANOM OŠTRICOM</b>	<b>ODVANJANJE NEKONVENCIONALNIM POSTUPCIMA OBRADNE</b>
Odrezivanje Odsjecanje škarama Odsjecanje noževima Odsjecanje kliješćima	Tokarenje Bušenje Upuštanje Razvrtanje Glodanje Blanjanje i dubljenje Provlačenje Pilenje Turpijanje Obrada četkama Grecanje	Brušenje Brušenje trakama Brušenje štapićima Honovanje Lepovanje Obrada mlazom tvrdih čestica: - abrazivne čestice - glatke čestice Obrada klizanjem: - bubnjanje, vibriranje - centrifugiranje - uranjanje	Toplinsko odvajanje: - čvrstim tijelom - tekućinom - plinom - el. Pražnjenem plina - snopom zraka Kemijsko odvajanje: - nagrizanjem - top.-kem. skid. oštr. rub. - kem.-topl. Odvajanjem Elektrokemijsko odvaj. : - el.-kem. Obradatočnih oblika - el.-kem. obr. površina - el.-kem. nagriz. metala

Slika 2. Podjela postupaka obrade odvajanjem [3]

Ipak, od svih gore navedenih postupaka odvajanjem čestica, u ovom radu posebno će se obratiti pažnja na samo jednu grupu, a to su postupci odvajanja alatom s geometrijski nedefiniranom oštricom u koje spadaju brušenje, superfiniš, honanje i lepanje.

## 2 BRUŠENJE

Brušenje je najzastupljeniji i najgospodarstveniji postupak završne obrade odvajanjem čestice alatom koji nema geometrijski definiranu oštricu, a upotrebljava se kod tvrdih materijala različitog oblika (ravnog, cilindričnog ili profilnog). Postupak se izvodi na brusilicama s alatima izrađenim od abrazivnih zrnaca koji mogu biti realizirani u obliku brusnih ploča ili brusnih vrpca. Isto tako, postupak za svoj cilj ima dobivanje male hrapavosti i visokog stupnja točnosti dimenzija obrađene površine obratka. [4]

Specifičnost brušenja u usporedbi s ostalim postupcima obrade odvajanjem leži u nedefiniranoj reznjoj oštrici koja je sastavljena od mnoštva brusnih zrnaca vezanih vezivom u kompaktnu cjelinu formirajući razne dimenzije i oblike samih brusnih ploča kao što je prikazano slikom 3. Nadalje, osim brusnih zrnaca i veziva na brusu se nalaze šupljine i pore koje za svoju ulogu imaju svojevrsno skladištenje nastalih odvojenih čestica prilikom same obrade.



Slika 3. Rezna površina brusila [4]

Brusna zrna su neujednačena, nedefinirane rezne geometrije i nejednoliko raspoređena po reznoj površini brusa, te su najčešće proizvedena od različite vrste korunda ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), silicijkarbida (SiC), kubičnibornitrida (CBN), polikristaličnog dijamanta (PCD). Svaki od materijala koji se upotrebljava za proizvodnju brusnih zrna ima posebne karakteristike zbog kojih se primjenjuje pri obradi određenih materijala obratka, tako primjerice korund će se u pravilu upotrebljavati kod obrade čelika, dok će silicijevkarbid biti više zastupljen pri obradi ostalih materijala poput: obojenih metala, keramike, stakla, ljevova.

Također, veziva su iznimno bitna jer određuju karakteristike samog brusa. Primjerice prema [4]: otpor veziva brusa prema izbijanju brusnih zrna iz rezne površine prilikom samog procesa brušenja (stupanj tvrdoće), te ovisno o uporabi veziva brus može biti suviše mekan zbog čega brus brzo gubi geometrijski oblik i obradak ima povećanu hrapavost ili pak suviše tvrd zbog čega dolazi do pojave vibracija, spaljivanja brusne površine. U današnjoj proizvodnji se koriste uglavnom keramička, smolna, gumena, te ojačana veziva.

Kod brušenja, glavno gibanje vrši sam alat i to rotacijom, dok posmično gibanje izvodi obradak, pri tome da posmično gibanje može biti pravocrtno, kružno, kombinirano.

Postupci brušenja se mogu podijeliti u više skupina, ovisno o promatranim kriterijima, ali u svrhu jednostavnosti prikaza najučestalijih načina primjene brušenja postoje prema [4] slijedeće podjele:

**a) Ovisno o obliku površine koja se obrađuje:**

- brušenje okruglih vanjskih površina,
- brušenje okruglih unutarnjih površina,
- brušenje ravnih površina,
- brušenje složenih površina.

**b) Ovisno o položaju rezne površine brusa prema obratku:**

- obodno brušenje,
- čeono brušenje,
- profilno brušenje.

**c) Ovisno o pravcu pomoćnog gibanja, gledano prema osi brusa:**

- aksijalno brušenje,
- radijalno brušenje.

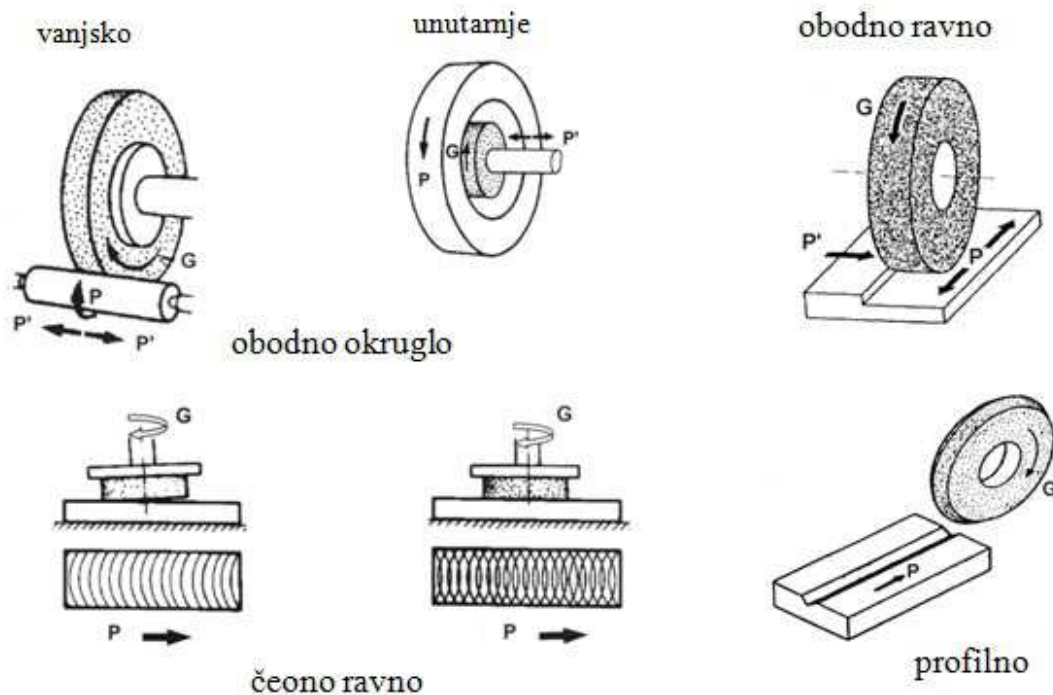
**d) Ovisno o smjeru brzine brusa i obratka:**

- istosmjerno brušenje,
- protusmjerno brušenje.

**e) Ovisno o postupcima brušenja povećane proizvodnosti:**

- duboko brušenje,
- brušenje kontinuiranim profiliranjem rezne površine brusa,
- duboko brušenje sa kontinuiranim profiliranjem rezne površine brusa,
- visokobrzinsko brušenje s CBN ili PCD brusom,
- visokoučinsko brušenje.

Zorni prikaz najučestalijih postupaka brušenja prema prethodno navedenim podjelama brušenja iskazan je slikom 4.



Slika 4. Najčešći postupci obrade brušenjem [4]

Brušenje je jedan od četiri najpoznatija postupka završne obrade materijala nedefiniranom reznom oštrom. Činjenica da je brušenje najzastupljeniji postupak u industriji, ostvarena je dugogodišnjim istraživanjima koja su imala za cilj unaprijeđenje postupka u svim mogućim segmentima. Zbog toga danas imamo postupke brušenja čiji se fokus temelji na povećanoj proizvodnosti.

### **3 POSTUPCI BRUŠENJA S POVEĆANOM PROIZVODNOŠĆU**

Trenutno najzanimljivija kategorija brušenja jest ona koja se odnosi na suvremene postupke. Kada se govori o suvremenom, pogotovo u strojarstvu, tada je kristalno jasno da se radi o nečemu novom, boljem, bržem, kvalitetnijem.

Pod pojmom boljeg u strojarstvu se krije mnogo uloženog truda, znanja, vremena, testiranja kako bi se ostvario boljitak s tada već poznatih postupaka, točnije kako bi se pokušala iskoristiti i najmanja sitnica koja bi mogla omogućiti veću proizvodnost, što za rezultat ima veći profit, kraće vrijeme procesa i mnoštvo toga što utječe na opstanak u danas vrlo konkurentom i surovom tržišnom okruženju.

Ideja razvitka postupaka brušenja s povećanom proizvodnošću nije samo usmjerena na razvitak unutar grane brušenja već i na moguću isplativu zamjenu nekih drugih postupaka obrade određenih vrsta materijala i oblika obratka s brušenjem, a da se pri tome pazi na isplativost cijelog postupka i kvalitetu dobivenog rezultata obrade.

Nulta točka razvoja postupaka brušenja s povećanom proizvodnošću je bilo klasično brušenje uz sve vanjske kriterije (tržišni zahtjevi, povećan profit, konkurentnost, i mnogi drugi) što je za rezultat dalo postupke koji se danas primjenjuju u raznim granama industrije, posebice u: auto industriji, industriji obnovljivih izvora energije, svemirskoj industriji.

Isprva se krenulo ubrzavati do tada poznatog klasičnog brušenja na taj način da se poveća dubina jednog prolaza brusa, što je rezultiralo postupkom dubokog brušenja. Nadalje je uslijedilo brušenje kontinuiranim profiliranjem rezne površine brusa, koje je reduciralo vrijeme obrade tako da se prilikom obrade obratka ujedno obrađuje i sam alat, u ovom slučaju brus. Daljnji logični slijed je bio usmjeren ka povećanju brzina samog postupka brušenja, te izmjenom samog materijala brusa pri čemu nastaje „visokobrzinsko brušenje sa CBN ili PCD brusom“. Za kraj, ostalo je „visokoučinsko brušenje“ koje je spoj prednosti postupka „dubokog brušenja“ i „visokobrzinskog brušenja“.



### 3.1 DUBOKO BRUŠENJE

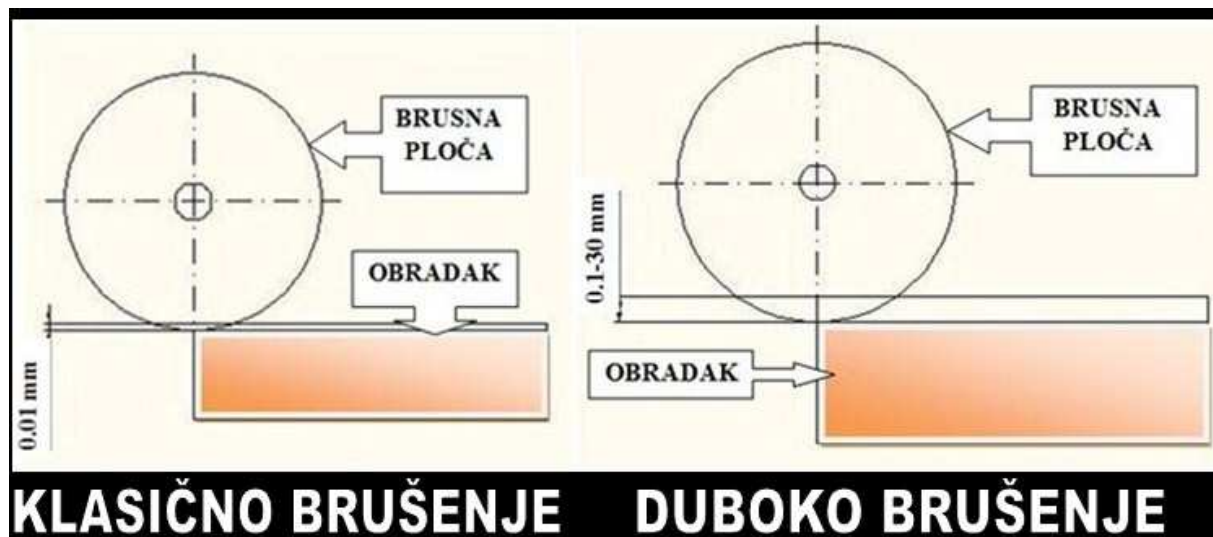
Kasnih pedesetih godina prošlog stoljeća u avio industriji, prilikom obrade dijelova lopatica kompresora i turbina postupcima glodanja i provlačenja, industrija se našla pred zidom. Uporabom glodanja i provlačenja na teškoobradivim materijalima i sve zahtjevnijim oblicima obradaka, proces obrade i dobivanja zadovoljavajuće kvalitete obrađene površine bio je težak, ako ne i neostvariv zadatak.

U to vrijeme, u Njemačkoj je Edmund Lang sa sinom Gerhandom izvodio eksperimente u području elektrokemijskog brušenja. [5] Prilikom izvođenja jednog od eksperimenata za koje su pomislili da je pošao po zlu, zbog sporog prolaza brusa kroz materijal, došli su do šokantnog otkrića. Naime, bez obzira na spori prolaz, brus je prošao kroz veliku dubinu materijala i to bez uporabe električne energije u procesu. Promatrajući rezultat obrade činilo se kao da je obradak obrađen glodalom. Upravo taj „propali“ eksperiment označio je početak novog razvoja brušenja, i to dubokog brušenja.

Duboko brušenje, engleskog naziva „Creep Feed Grinding“, se pokazalo kao postupak strojne obrade koji može obraditi iznimno teškoobradive materijale, na vrlo lagan i ekonomičan način, pri tome s minimalnom ili nikakvom pojavom srha, a da cijela obrada ima određen stupanj preciznosti postupka. Zbog te očigledne prednosti, duboko brušenje se proširilo i na ostale industrijske grane.

Po definiciji [7] duboko brušenje je postupak s velikim dubinama brušenja, ali malim brzinama obradne površine pri čemu se tim postupkom može obraditi cijela duljina obratka s jednim prolazom što je uvjetovano i samom snagom stroja.

Slikom 5 zorno je prikazana osnovna razlika između klasičnog brušenja i dubokog brušenja u pogledu dubine jednog prolaza. Kod dubokog brušenja moguće je ukloniti i do 100 puta više materijala jednim prolazom nego kod klasičnog brušenja, točnije u nekim primjerima u praksi dubokim brušenjem moguće je skinuti i do 30 mm materijala u jednom prolazu brusne ploče.



Slika 5. Usporedba klasičnog brušenja sa dubokim

Duboko brušenje je poput glodanja s razlikom da je alat kojim se izvodi postupak obrade brusna ploča. Značajna prednost dubokog brušenja je mogućnost modificiranja oblika brusa, što uvelike omogućava mnogo lakše prilagodbe složenim oblicima obratka nego li u slučaju glodanja.

Uspoređujući klasično brušenje s dubokim brušenjem izraženo je nekoliko značajnih poboljšanja koja su uslijedila razvojem dubokog brušenja. U nastavku su navedene glavne prednosti dubokog brušenja prema [6].

Stvarno vrijeme potrebno za obradu, kod primjera klasičnog brušenja može doći do povećanja gubitka vremena obrade u slučajevima kada brus nije u kontaktu sa obratkom pri povratku radnog stola u položaj za početak obrade, zbog čega je stvarno vrijeme obrade prekoračeno.

Manja pojava neželjenih vibracija, povećanom dubinom prolaza pri dubokom brušenju dolazi do stvaranja većeg sučelja između brusa i obratka. Upravo to sučelje u spoju sa malim brzinama gibanja radnog stola ima za rezultat tendenciju stabiliziranja vibracija nastalih prilikom samog procesa brušenja.

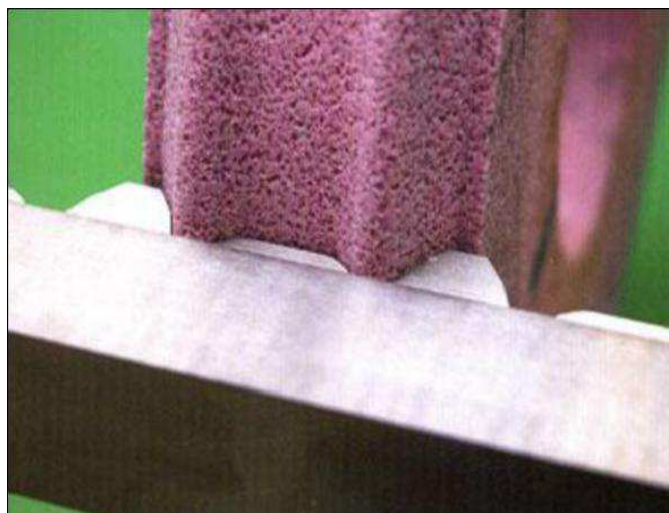
Povećane karakteristike zadržavanja oblika, kako brus sporo prolazi kroz obradak i ta se radnja vrši samo jednom, pri tome tvoreći kompletan utor koji ujednačava opterećenje radne površine brusa. Na taj se način eliminira smicanje abrazivnih čestica koje se javlja kod klasičnog brušenja prilikom udara brusa o rub obratka.

Manja termička oštećenja, kod klasičnog brušenja pri većoj dubini prolaza, te većim brzinama gibanja stola i brzinama vrtnje vretena stvara se toplina koja se prenosi na sam obradak u obliku impulsa. Kod dubokog brušenja dolazi do konstantnog, umjerenog odvajanja topline koja se prenosi na veliku površinu što rezultira nižim srednjim temperaturnim vrijednostima i nižim temperaturnim maksimumima. Ipak, do termičkog oštećenja obratka može doći, ali na mjestima koja prethode obradi brusom pa je takva pojava zanemariva s obzirom da će biti uklonjena prilikom obrade.

Specifična energija koja predstavlja energiju potrebnu za uklanjanje jedne čestice volumena materijala predstavlja još jedan kriterij usporedbe postupaka brušenja.

Duboko brušenje ima viši iznos specifične energije zbog duljine kuta skidanja, duge uske odvojene čestice, kontinuiranog smanjenja samog brusa i ograničenja na duljinu brusa prije nego li nastupi termičko oštećenje. Veći udio energije prenesen je na odvojenu česticu i potrebno je 176 sekundi za uklanjanje jednog kubičnog inča materijala pri čemu snaga vretena mora biti 38 kW za klasične brzine vrtnje. [5]

Brus koji se upotrebljava pri dubokom brušenju mora biti jako porozan i otvorene strukture do te mjere da su šupljine jasno vidljive golim okom (slika 6). Upravo taj „nježan“ kostur vrlo je važan zbog potrebe za osiguravanjem prostora za velike količine odvojene čestice nastale uslijed obrade. [8]



Slika 6. Primjer visokoporoznog brusa kod dubokog brušenja [9]

Postupak dubokog brušenja pripada klasi brušenja s povećanom proizvodnošću zbog mogućnosti obrade velikih dubina kroz materijal površine, čime je realizirana vremenska ušteda cijelog postupka obrade u usporedbi sa klasičnim brušenjem.

### 3.2 BRUŠENJE S KONTINUIRANIM PROFILIRANJEM

Proces klasičnog brušenja može biti podijeljen na dvije faze, fazu obrade i fazu pauze. Dakle, vrijeme obrade u kojoj brus vrši obradu obratka i vrijeme pauze koje može biti prisutno zbog više parametara, ali najznačajniji od svih je gubitak vremena uzrokovan trošenjem brusa prilikom obrade zbog čega obrada mora stati, izvršiti se profiliranje rezne površine brusa, te nastaviti dalje s započetom obradom.

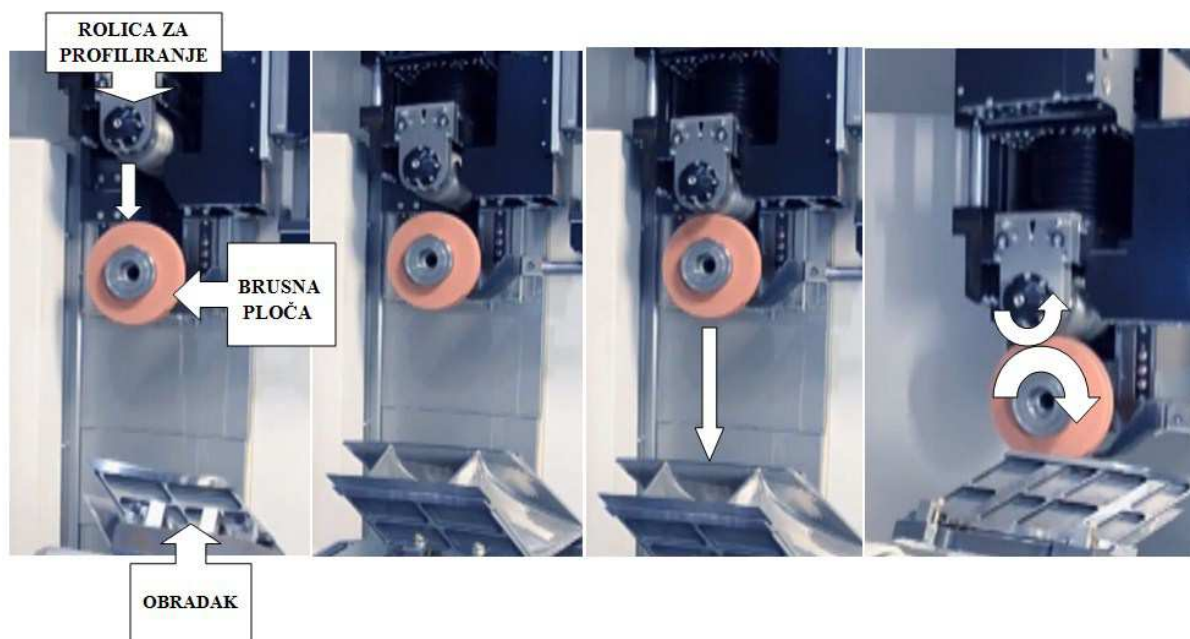
Pri kontinuiranom profiliranju rezne površine brusa, još poznatom po imenu „Continuous Dressing“, skraćeno „CD“, rezna površina se oštiri i oblikuje za vrijeme trajanja obrade obratka zbog čega ne postoji procesni ciklus jer je faza pauze u postupku eliminirana. Ovakvim brušenjem omogućeno je ostvarivanje boljeg omjera uklonjene čestice i povećava se stupanj zadržavanja oblika obrađene površine, te dimenzijska stabilnost.

Također, topografija rezne površine brusa ostaje nepromijenjena pri čemu u svaki novi brusni zahvat rezna površina ulazi oštra i čista što osigurava stalne uvjete brušenja. [9]

Kontinuirano profiliranje zahtjeva posebno dizajnirane strojeve veće krutosti, viših snaga uz dodatak kompenzacijskog vretena. Kompenzacijsko vreteno je dio stroja koje ima ulogu automatskog ubrzavanja brzine vrtnje samog brusa uslijed smanjenja promjera, te osiguravanje konstante obodne brzine vrtnje brusa.

Omjer kojim obradno sredstvo vrši obradu nad brusom mora biti savršeno sinkronizirano s omjerom kojim brus uklanja čestice sa obratka u protivnom paralelna radnja brušenja obratka i obrade rezne površine nije moguća.

Kontinuirano profiliranje opisano je slikom 7 kroz korake kako slijede: brusna ploča nalazi se u neutralnom položaju, te se rolica za „CD“ obradu spušta u zahvat s brusnom pločom. U tako realiziranom spoju obje se pozicioniraju u položaj za početak obrade neobrađene površine obratka. Kod kontinuiranog profiliranja se rotacijom brusa obrađuje obradak, a rotacijom rollice za profiliranje se vrši obrada brusa.



Slika 7. Primjer postupka CD brušenja iz industrijske proizvodnje [10]

Postupak brušenja sa kontinuiranim profiliranjem se uvrštava u postupke brušenja s povećanom proizvodnošću zbog mogućnosti obrade rezne površine brusa prilikom same obrade čime se uvelike skraćuje ukupno vrijeme obrade.



Slika 8. Alati za obradu rezne površine brusne ploče [13]

### **3.3 DUBOKO BRUŠENJE S KONTINUIRANIM PROFILIRANJEM BRUSA**

Otkrićem dubokog brušenja pedesetih godina prošlog stoljeća promijenila se percepcija brušenja od jednog dugotrajnog postupka obrade koji obrađuje zanemarivo malu količinu površine do postupka koji je postao ozbiljna konkurencija postupcima poput glodanja i provlačenja. No, tu razvoj današnjeg brušenja nije stao.

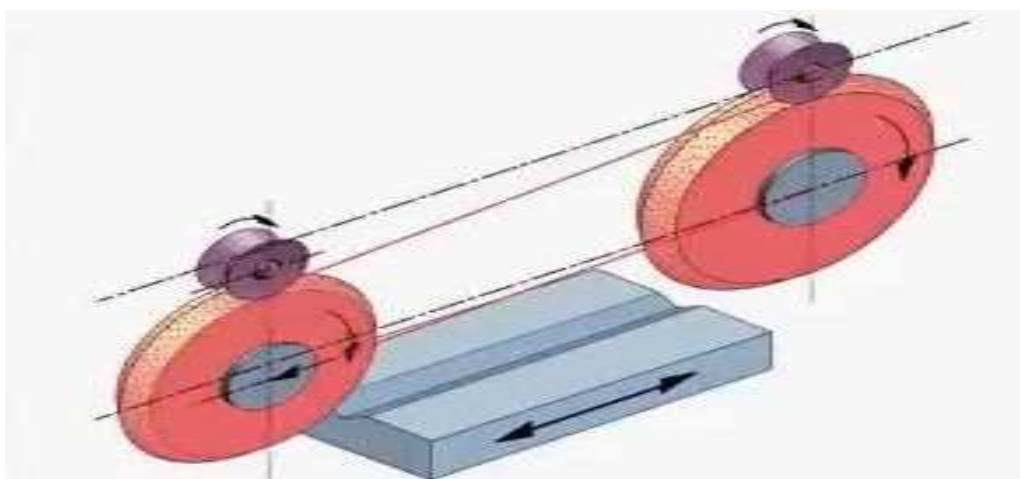
Kroz dvadeset godina uporabe dubokog brušenja u proizvodnji došlo je do velikih promjena zbog kojih je duboko brušenje moralo otići stepenicu više. Unaprjeđenja su bila potrebna u područjima proizvodnosti i brzine izvođenja postupka, te u području izbjegavanja površinskog napuknuća i gorenja obratka.

Stuard C. Salamon 1970-tih godina, promatrajući princip rada dubokog brušenja odlučio je analizirati i mogućnost oštrenja rezne površine brusa tako da ga podvrgne kontinuiranom profiliranju. Rezultat koji je dobio zaprepastio ga je. Naime, očekivao je da će uzorci materijala biti u potpunosti neobradivi, ali dogodilo se suprotno, uzorci su bili iznimno oštri, bez termičkih oštećenja ili srha. [8]

Iznenaden rezultatom, Salamon je povećavao milimetar po milimetar dubinu obrade i na kraju je došao do vrijednosti koje su bile karakteristične za odvojene čestice dubokim brušenjem. [8]

Postupak dubokog brušenja s kontinuiranim profiliranjem brusa, poznat još pod engleskim nazivom „Continuous Dress Creep Feed“, skraćeno „CDCF“, je postupak koji je karakteriziran prednostima dubokog brušenja i postupka kontinuirane obrade rezne površine brusa.

Rezna površina brusne ploče u CDCF postupku se neprekidno obrađuje tijekom strojne obrade, te se na taj način zadržava oštrina i preciznost. Stupanj oštine brusne ploče je toliki da se količina odstranjenja čestice može povećati 20 ili više puta u odnosu na klasično brušenje, čak i u slučajevima teškoobradivih materijala poput legura na bazi nikla i kobalta.



Slika 9. Idejni princip izvođenja CDCF brušenja [11]

Neprekinuta obrada rezne površine brusa, prikazana slikom 9, omogućava stabilnost postupka obrade zbog koje se ostvaruju uštede na energiji, postižu se manja naprezanja u materijalu i osigurava se dovoljno mjesta u šupljinama brusa za prihvat novonastalih odvojenih čestica.

Unikatan element CDCF brušenja je rotirajući uređaj za obradu rezne površine brusa, dijamantna rolica, koja je pozicionirana iznad brusa, te se rotira konstantnom brzinom u odnosu na obodnu brzinu brusne ploče. Brzina rotacije dijamantne rollice je prethodno programirana na vrijednost koja je za 0,2 veća u odnosu na obodnu brzinu brusne ploče. [11]

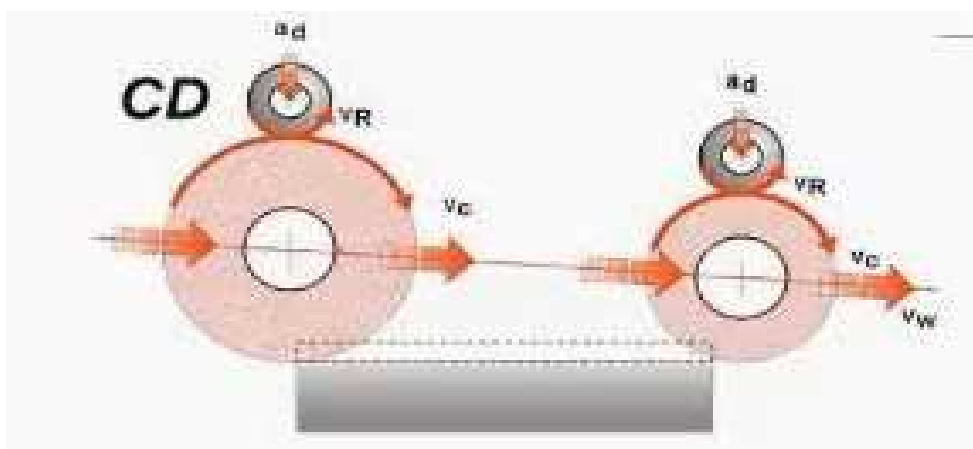
Dijamantna rolica, slika 10, se rotira u istom smjeru kao i brusna ploča što je primjer istosmjerne rotacije. Uslijed istosmjerne rotacije različitih brzina, ostvaruje se rezanje oblika rezne površine brusa što omogućava da brus zadrži veću oštrinu i čišće šupljine unutar strukture koje prihvaćaju odvojene čestice.



Slika 10. Sustav kontinuiranog profiliranja kod CDCF brušenja [12]

Rotacija rollice mora biti kontrolirana servo motorom promjenjive brzine jer se te brzine moraju prilagođavati obodnim brzinama brusa, koje se mijenjaju uslijed smanjenja promjera brusa. Smanjenjem promjera brusa obodna brzina brusa se smanjuje što automatski iziskuje sinkronizaciju brzine dijamantne rollice kako bi se zadržao traženi omjer brzina vrtnje dijamante rollice i brusne ploče. Prilikom upotrebe kontinuirane obrade rezne površine brusa u praksi postoje dva primjera njene uporabe.

Prvi primjer je postupak neprekinute obrade rezne površine brusa prilikom cijelog trajanja obrade prateći promjenu promjera brusa prikazan je slikom 11.



Slika 11. Neprekinuta obrada rezne površine brusa [11]

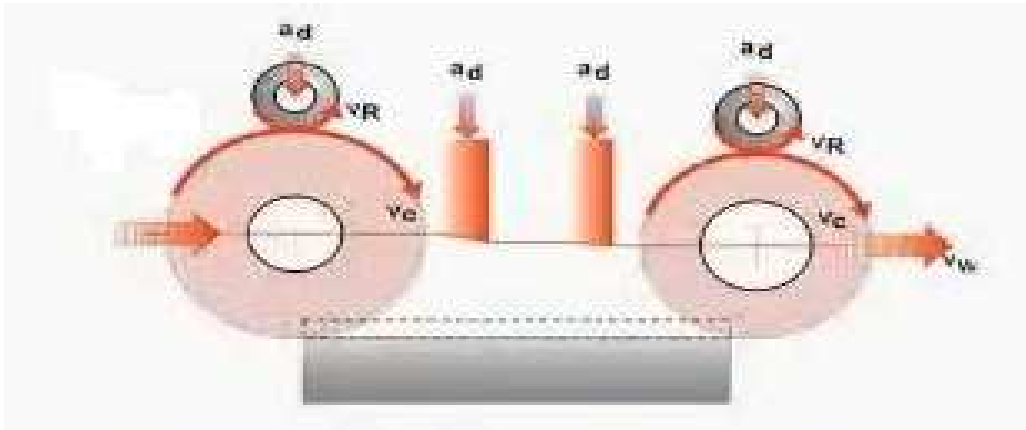
Ovakav režim rada se koristi kod obratka proizvedenih iz teškoobradivih materijala, pri čijoj je obradi potrebno stabilan, vrlo točan postupak, uskih tolerancija oblika, uz pojavu velike količine odstranjene čestice. Klasičan primjer takvih režima jest brušenje ozubljenja zupčanika, slika 12.



Slika 12. Neprekinuta obrada rezne površine brusa u praksi [11]



Drugi primjer predstavlja slučaj u kojem obrada rezne površine brusa nije potrebna tijekom cijelog postupka obrade već samo po potrebi. Naime, u primjerima iznimno velikih duljina obratka profiliranje rezne površine brusa se uključuje i isključuje po potrebi kako bi se postigla ujednačena oštrina brusa na svim dijelovima obratka, a na taj način se osigurava i jednolika obrada cijele duljine.



Slika 13. Obrada rezne površine brusa s nadzorom snage vretena [11]

Ovim režimom rada optimalizira se potreba za obradom rezne površine brusa, što postupak brušenja čini ekonomičnijim. Da bi se postigla optimalizacija vrši se neprekidni nadzor snage motora glavnog vretena. Tako se prilikom većeg udjela istrošenih oštrica i većeg zapunjenja brusa odvojenim česticama, trenje povećava, brus se teže okreće što automatski zahtjeva povećanje snage motora glavnog vretena.

Porast potrošnje snage motora glavnog vretena sustavu praćenja je znak da je potrebno obraditi reznu površinu brusa zbog čega se uključuje potrebni sustav.



Slika 14. Obrada dugih cilindričnih obratka [11]

CDCF ima najnižu specifičnu energiju zbog maksimalno postignutog stupnja oštrenja zrna i manjka energije trenja. Većina energije pri brušenju se prenosi na odvajanje odvojenih čestica, pri čemu je potrebno samo 17 sekundi za obradu kubičnog inča materijala, te pri tome snaga motora glavnog vretena mora biti 28 kW uz brzine rezanja kao kod klasičnog brušenja. [5]

Parametri stroja uvelike ovise o dubini i brzini prolaza, zahtjevima za kvalitetu, vrsti materijala obratka. Ukoliko se obrađuju teškoobradivi materijali s velikom dubinom obrade, stroj za CDCF brušenje mora biti puno većih snaga u odnosu na klasično brušenje. Vrijednost snaga se nalaze u području između 48,5 i 112 kW. [13]

Materijali na bazi nikla i kobalta spojenih u napredne strukture materijala, koji se upotrebljavaju u avio industriji iznimno su osjetljivi na pojavu topline uslijed trenja između tupog brusa i površine obrade. Stoga je velika prednost CDCF postupka što omogućava konstantnu oštrinu brusa i time znatno smanjuje toplinu uslijed trenja.

Nadalje, postupak je pokrenuo revoluciju u proizvodnji lopatica turbine, te uzrokovao razvoj obradnih brusnih čelija koje su imale mogućnost grubo odlivenu lopaticu turbine obraditi do završnih detalja, potpuno automatski, bez čovjekovog rada.

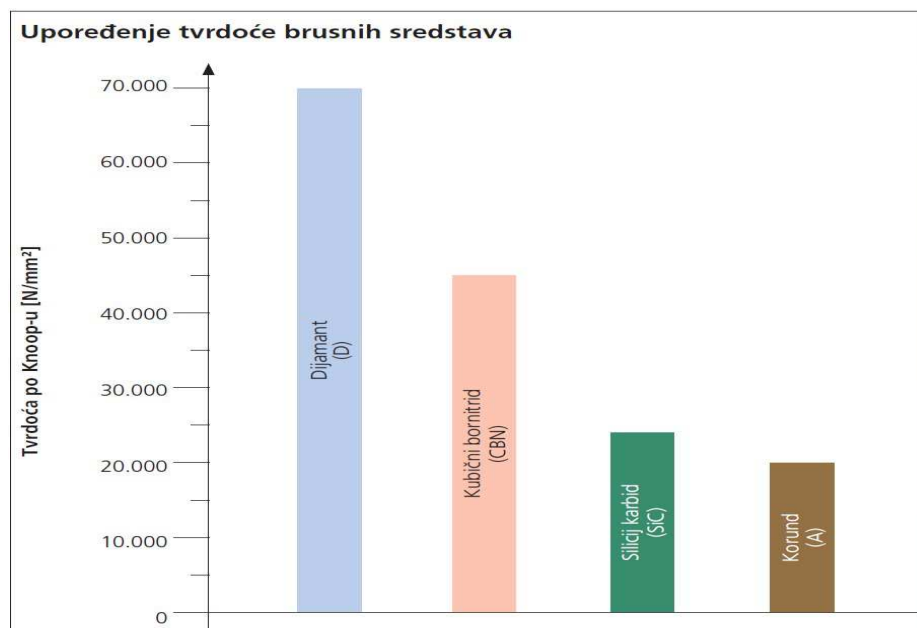
### 3.4 VISOKOBRZINSKO BRUŠENJE SA CBN ili PCD BRUSOM

Svi postupci brušenja koji su do sada obrađeni završnim radom imaju jednu zajedničku točku. Nastali su kao rezultat izazova istraživanja inženjera, znanstvenika, industrijske proizvodnje sa svrhom poboljšanja klasičnog brušenja. Duboko brušenje, brušenje sa kontinuiranim profiliranjem rezne površine brusa i duboko brušenje sa kontinuiranim profiliranjem rezne površine brusa imaju zajedničko smanjenje ukupnog vremena postupka obrade.

No, daljnji napredak brušenja je bio usmjeren u drugom pravcu. 1990-tih godina se tražio način kako poboljšati materijale od kojih je napravljen brus i tako je započelo istraživanje superabraziva.

Logičan izbor novih materijala je bio dijamant, za kojeg je poznato da je najtvrdi materijal u prirodi. Danas se dijamant može i sintetizirati pa je tako nastao jeftiniji i češće upotrebljavani PCD-a (polikristalični dijamant). Odmah iza njega uslijedila je i primjena kubičnog bornitrida CBN-a (kubični bornitrid). Oba materijala imaju zajedničku vrstu strukture, kubična struktura sa fizikalnim karakteristikama oba materijala. [14]

U usporedbi sa materijalima za klasično brušenje, PCD (sintetički dijamant) i CBN (kubični bornitrid) iznimno su tvrdi što je vidljivo iz slike 15, ali isto tako imaju veći vijek trajanja i bolju mogućnost zadržavanja profila brusne ploče.

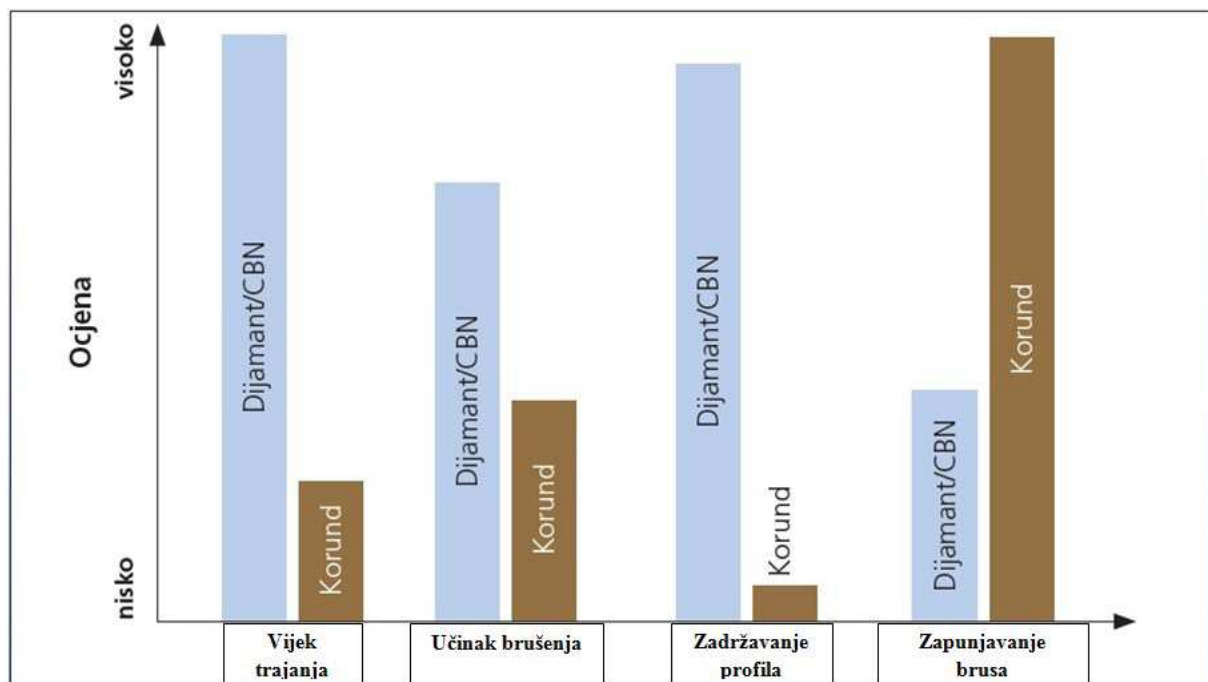


Slika 15. Vrijednosti tvrdoće brusnih materijala [14]

Uporabom PCD-a i CBN-a kao brusnih materijala, osim dužeg vijeka trajanja i zadržavanja profila brusne ploče, sprječavaju se termička oštećenja obratka, ostvaruje se jednaka kvaliteta obrade prilikom mnogo ponavljanja, rjeđe se tupe pa se ostvaruje ušteda vremena postupka obrade. [14]

Dijamant kao brusno sredstvo nije pogodan za obradu čelika. Kemijska reakcija između željeza u čeliku i ugljika uzrokuje vrlo brzo trošenje dijamantnog brusa, zbog čega obradu čini neekonomičnom. S druge strane, brus proizveden od dijamanta vrlo je koristan pri obradi stakla, keramike, porculana, silicija, gume, vatrootpornih materijala i mnogih drugih. [14]

CBN brus je kemijski inertan na većinu materijala, te ima visoku tvrdoću, čvrstoću, žilavost, otpornost na trošenje i toplinsku vodljivost, a uobičajeno je žuto – smeđe ili zlatne boje. Područje uporabe CBN brusa nadopunjuje dijamante tako da se s CBN brusom obrađuju materijali koji se ne mogu obraditi dijamantom, poput: željeza, brzoreznih čelika, alatnih čelika, čelika za cementiranje, te legure kobalta i nikla. [9]



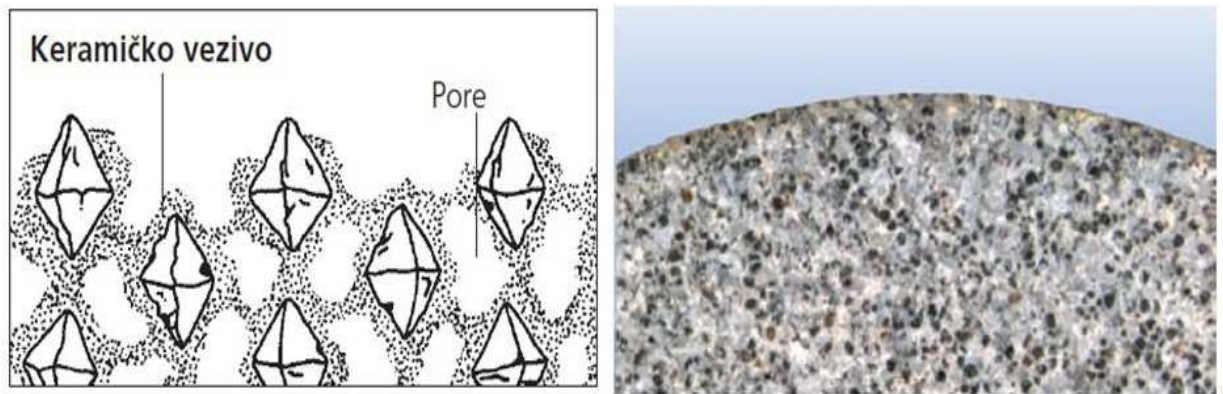
Slika 16. Usporedba PCD/CBN brusnih materijala s korundom [14]

Slikom 16 prikazani su kvalitativni rezultati usporedbe PCD/CBN brusnih materijala sa korundom u parametrima vijeka trajanja, učinka brušenja, zadržavanja profila i zapunjavanja brusa. Vidljiva prednost PCD/CBN brusa naprema korunda uvelike se reflektira i na uštede u postupku obrade.

Brus se sastoji od tri glavna dijela: abraziv, vezivo i pore. Kako bi brus bio funkcionalan, abraziv i vezivo moraju biti spojeni u jednu kompaktnu cjelinu. Tako je i sa superabrazivima.

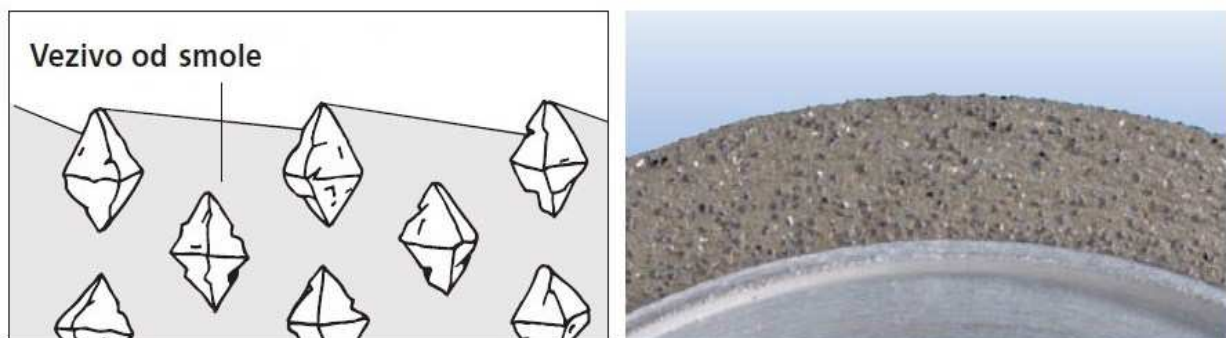
Uporabom keramičkog veziva u kombinaciji sa CBN abrazivom osiguravaju se manje termičke promjene, mogućnost prilagodbe strukture veziva zahtjevima pojedinog procesa obrade, te jednostavno profiliranje i oštrenje alata. Struktura keramičkog veziva sastoji se od brusnog zrna, veziva i pora, vidljivo na slici 17.

Najčešća primjena keramički vezanih CBN brusnih ploča je prilikom unutarnjeg brušenja čelika [14].



Slika 17. Struktura i izgled brusa s keramičkim vezivom [14]

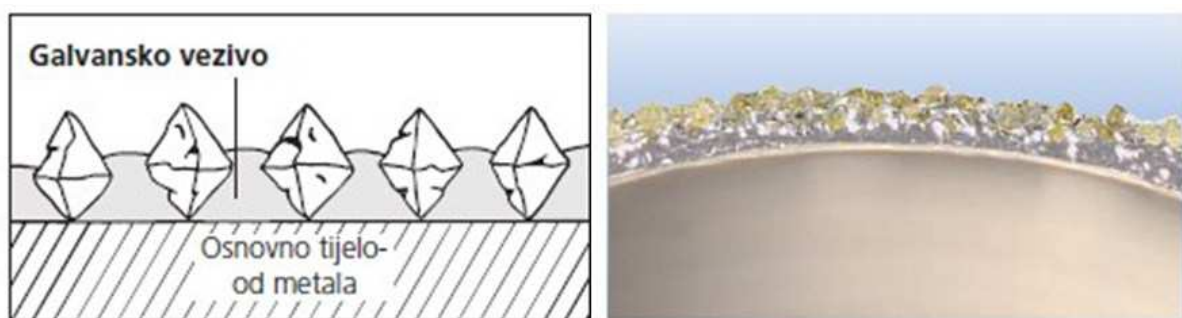
Vezivo od smole, obzirom na svoju malu tvrdoću ima vrlo visoki učinak pri odvajanju čestice, te također osigurava manje termičke promjene. Struktura brusne prevlake sastoji se od: brusnog zrna, veziva i materijala za popunjavanje. Iz slike 18 vidljivo je kako je vezivo vrlo gusto zbog čega nema pora. Zbog svojih karakteristika najčešće se upotrebljava prilikom brušenja alata, posebice tvrdog metala zbog visoke otpornosti na trošenje i niskih termičkih oštećenja.



Slika 18. Struktura i izgled brusa s vezivom od smole [14]

CBN/PCD brusna zrna galvanski se nanose na metalnu bazu koja je vezana slojem nikla. Tim se postupkom ostvaruje brus vrlo otvorene strukture koji može primiti veliki volumen odstranjene čestice. Zbog jednoslojne prevlake ovakvim brusom vrlo lako se reže, a cijena je uvjetovana cijenom same prevlake. Postupkom galvanizacije se može prevući bilo koji osnovni geometrijski oblik brusa.

Ovisno o veličini zrna karakteristike galvanski obloženih bruseva se mijenjaju. Ukoliko je brus realiziran velikim granulatom primjenjivat će se kod mekanih materijala, dok će se za obradu tvrdih materijala upotrebljavati brus sitnijeg granulata zrna.



Slika 19. Struktura i izgled brusa dobivenog galvaniziranjem [14]

Uporabom naprednijih materijala za proizvodnju alata za brušenje ostvarile su se osnove za povećanjem brzina obrade, posebice obodnih brzina brusa koje u industrijskoj upotrebi mogu dostizati i do 120 m/s. [9]

Pri tim brzinama nije moguće ostvariti veće dubine i posmične brzine obratka u usporedbi sa klasičnim brušenjem. Ipak, riječ je o visokobrzinskom brušenju koje bez obzira na nešto veće dubine i posmične brzine ima i veću proizvodnost zbog primarnog svojstva, a to je i do 4 puta veća obodna brzina brusa nego što je pri uporabi klasičnog brušenja.

Zbog visokih brzina posebni su zahtjevi i na sam stroj, koji mora biti vrlo krut, točan, s minimalnom pojavom vibracija. Posebna se pažnja obraća i na balansiranje ovakvih strojeva, točnije vretena brusilice i brusa u cilju ostvarenja stabilnijeg postupka obrade.

Glavna karakteristika visokobrzinskog brušenja omogućila je primjenu u raznim područjima ljudske djelatnost, a posebice je značajno doprinijela u željeznici.

Naime, zbog brzina obrade i do 120 m/s strojna obrada željezničkih tračnica izvedljiva je uz pomoć stroja kojeg vuče lokomotiva pri brzinama od čak 80 km/h. Na taj je način uporabom ove unikatne tehnologije brušenja omogućeno neprekidno odvijanje prometa vlakova jer nema potrebe za zaustavljanjem prometa radi obrade kad se ista odvija cijelo vrijeme u pokretu.

Željezničke tračnice, bez obzira od kojeg su materijala napravljene, podvrgnute su nizom parametara koji mijenjaju površinska svojstva. Konstantnim atmosferskim promjenama, naprezanjima uslijed pojave trenja pri kotrljanju kotača teških vlakova, temperaturnim oscilacijama, može doći do pojave oštećenja tračnica.

Oštećenja u početku nastaju u obliku mikropukotina koja su jedva vidljiva, ali s vremenom su iznimno opasna jer prodiru sve dublje i dublje u strukturu materijala tračnica, što i samoj konačnici može izazvati pucanje tračnica uslijed povećanja pukotina. Posljedica takvog pucanja uzrokuje neupotrebljivost tračnice, te predstavlja sigurnosni rizik za sve sudionike u željezničkom prometu.

Pojava mikropukotina na željezničkoj tračnici i njen površinski razvoj uslijed njenog trošenja prikazana je slikom 20.



Slika 20. Pojava mikropukotina na željezničkim tračnicama [15]

Klasičnim brušenjem moguće je eliminirati proces pojave pukotina uklanjajući do 2 mm gornje oštećene površine tračnice, ali to uključuje mnogo vremena, visoke troškove i poremećaje u rasporedu prometovanja vlakova. Obrada klasičnim brušenjem prikazana je slikom 21.

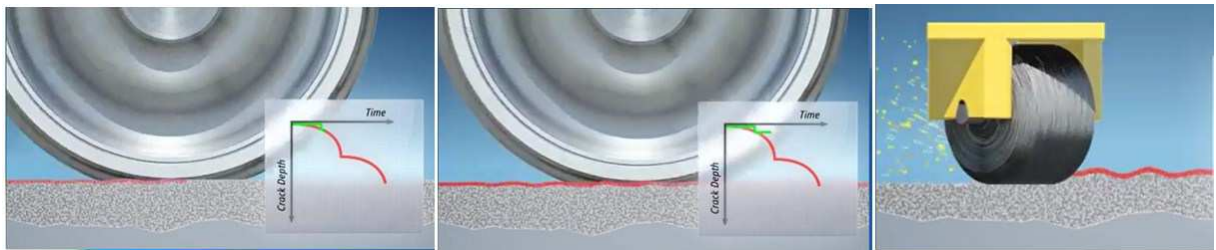


Slika 21. Obrada gornje površine tračnica klasičnim brušenjem [15]



Efikasnija alternativa klasičnom brušenju je visokobrzinsko brušenje koje je puno brži i isplativiji postupak obrade.

Princip obrade temelji se na uranjenom uklanjanju mikropukotina na taj način sprečavajući daljnji razvoj oštećenja. Prilikom ovakve obrade uklanja se vrlo tanak sloj materijala tračnice, te se osim obrade mikropukotina vrši i profiliranje tračnice koje je iznimno bitno za pravilno prijanjanje kotača vlakova na površinu tračnica. Takvo profiliranje povećava životni vijek tračnice, osigurava manje vibracije, te povećava sigurnost i udobnost prometovanja. Postupak visokobrzinske obrade brušenjem prikazan je slikom 22.



Slika 22. Obrada tračnica visokobrzinskim brušenjem [15]

Obrada se izvodi tako da niz bruseva formiranih u jednu liniju obrađuju površinu tračnice u smjeru kretanja lokomotive koja vuče stroj. Kut obrade je podesiv u samom postupku obrade što omogućuje profiliranje oblika tračnice. Odvojena čestica nastala obradom trenutno se prikuplja u spremište stroja, te se na taj način osigurava čistoća postupka obrade i očuvanje okoliša.

Slikom 23 prikazan je vanjski i unutarnji izgled stroja za brušenje dugačkih željezničkih tračnica.



Slika 23. Izgled stroja za brušenje željezničkih tračnica [15]

### 3.5 VISOKOUČINSKO BRUŠENJE

Materijali od kojih je sastavljen brus, pri tome misleći na superabrazive, otvorili su vrata novih mogućnosti unaprjeđenja postupaka brušenja. Visokobrzinsko brušenje, sa CBN brusom je bila osnova za slijedeći korak.

Visokoučinsko brušenje, u engleskom jeziku poznato i pod nazivom „High Efficiency Deep Grinding“, je kombinirani postupak visokobrzinskog brušenja sa CBN brusevima i dubokog brušenja okarakteriziran prednostima oba postupka.

Glavne značajke visokoučinskog brušenja čine: visoke obodne brzine brusa (čak i do 250 m/s), velike dubine prolaza (od 0,1 do 25 mm), veliku količinu odstranjene čestice bez oštećenja površine obratka. [16]

Visokoučinsko brušenje predstavlja novu tehnologiju obrade koja se još uvijek nalazi u fazi istraživanja i potrebno je izvršiti još puno testiranja, mjerenja, prilagodbi kako bi postupak bio primjenjiv u većim razmjerima. Trenutno, visokoučinsko brušenje ima više izazova koje je potrebno odgonetnuti, nego prednosti.

Polazišna točka jednog od izazova je glavna prednost visokoučinskog brušenja, velike obodne brzine brusa. Naime, zbog tih velikih brzina vrtnje, visokoučinsko brušenje može uopće biti neprimjenjivo, a ako se i zadovolje potrebni zahtjevi na alat i stroj, dolazi se do slijedeće prepreke, kako kontrolirati parametre postupka koji se još uvijek istražuje.

Međutim, ako se obrati pažnja na detalje, nije samo kontrola postupka problem, već sa nameće logično pitanje, kako pri tako velikim obodnim brzinama brusa obraditi reznu površnu brusa.

Pri visokoučinskom brušenju, koristi se CBN brus proizveden na metalnog bazi. Zbog visoke cijene superabraziva kao i samog brusa, cilj obrade rezne površine brusa je očistiti brus uz što manje uklanjanja aktivnih superabrazivnih čestica, a da bi se cilj ostvario potrebno je osigurati vrlo mali posmak koji omogućava obradu rezne površine.

Jedno od rješenja moglo bi se kriti u tehnici obrade rezne površine brusa dodirnom, još poznatija pod engleski nazivom „Touch Dressing“. Prilikom „TD“-a potrebno je ostvariti vrlo mali, mikronski pomak između brusa i alata za obradu brusa, što zahtjeva optimalizaciju obrade rezne površine brusa. Za ostvarivanje krucijalno potrebne optimalizacija u nekontroliranim uvjetima potrebni su senzori. [9]

Senzor pravilno postavljen u određenom segmentu obrade vrlo je važan jer omogućava kontrolu i analizu tog pojedinog segmenta. Primjerice, kad je riječ o obradi rezne površine brusa pri visokoučinskom brušenju senzor je moguće postaviti u samu bazu brusne ploče i na taj način pridonijeti kontroli mikronskih pomaka kojima se obrada izvodi.

Slijedeće područje postupka na kojem je potrebno izvršiti dodatna mjerenja i usavršavanja jest područje hlađenja. Pri postupcima brušenja energija kontakta brusne ploče i površine obratka pretvara se u toplinu koja je vrlo nepovoljna zbog većeg utroška energije, viših temperatura obrade i mogućnosti oštećenja obratka.

Glavna namjena sredstva za hlađenje u postupcima brušenja je sniziti temperature nastale između brusa i obratka, smanjiti habanje brusa i ukloniti odvojenu česticu sa brusa i područja obrade. No, nije sve tako idealno. Spoj prednosti visokoučinskog brušenja uvelike otežavaju izvršenje glavnih ciljeva sredstva za hlađenje jer je vrlo teško prodrijeti kroz cijelu kontaktnu duljinu brušenja. [16]

Specifična energija visokoučinskog brušenja je vrlo niska zbog upotrebe superabraziva kojima se mogu obrađivati i veće duljine od duljina obrade kod dubokog brušenja. Većina energije prenosi se na odvojenu česticu i sami brus, a za obradu jedno kubičnog inča materijala potrebno je 83 sekunde, pri čemu su potrebne visoke snage vretena (33 kW) u uvjetima velikih brzina rotacije vretena. [5]

Za zaključiti je da je za širu primjenu visokoučinskog brušenja potreban razvoj visokopouzdanih sustava nadzora i dijagnostike. Također, potrebno je istražiti strategije kontroliranja kojima će biti temelj dobiveni rezultati mjerenja svih vrsta parametara koji direktno utječu na izvedljivost postupka obrade.

### 3.6 ELEKTROKEMIJSKO BRUŠENJE

Elektrokemijsko brušenje, poznato još pod engleskim nazivom „Electrochemical Grinding“ odnosno skraćenicom „ECG“. Ovo brušenje je spoj elektrokemijske obrade i klasičnog postupka brušenja. Obrada se vrši mehaničkim uklanjanjem čestice abrazivima i elektrokemijskom reakcijom metala uz prisustvo električne energije.

Ovakva obrada može obraditi dijelove bez: pojave naprezanja i srha, drugih metalurških oštećenja uslijed mehaničkog uklanjanja čestice, mehaničkih izobličenja, te zbog stvaranja vrlo male količine topline prilikom samog postupka vrlo je pogodna za obradu termički osjetljivih dijelova.

Glavni temelj realizacije ovog postupka je Faraday-ev zakon prema kojem je količina kemijske promjene nastala na elektrodi proporcionalna količini električne energije koja protječe između elektroda. Glavnina postupka vrši se upravo elektrokemijskom reakcijom.

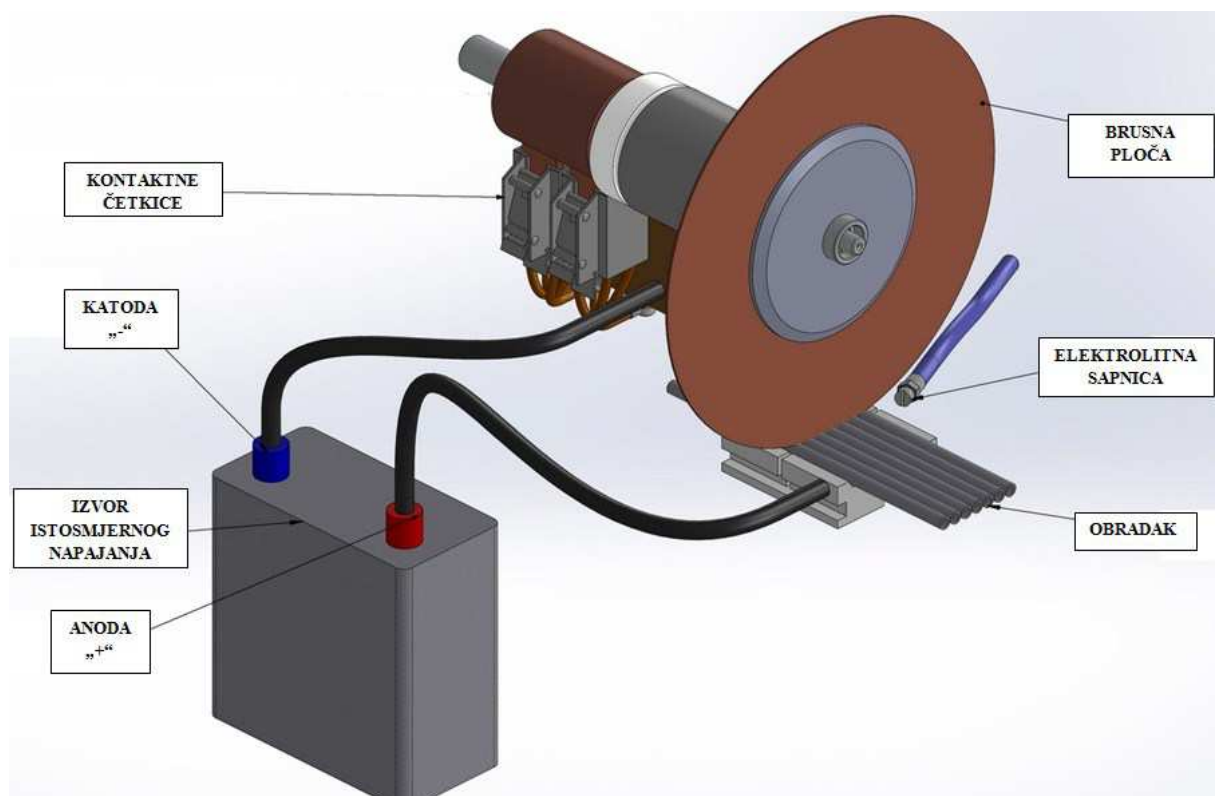
U trenutku protjecanja električne energije između elektroda uz pomoć elektrolita dolazi do pojave elektrokemijske oksidacije i redukcije na površini elektrode. Elektrokemijski potencijal između elektrolita uzrokuje protjecanje struje od anode prema katodi u istosmjernom strujnom krugu, pri čemu je u ECG postupku anoda obradak, a katoda je alat, točnije elektrovodljiva brusna ploča. [18]

Elektrolit je ključan dio ECG postupka. Isti se pumpom iz spremnika kroz sapnicu neprekinutim mlazom dovodi do kontakta između brusne ploče i obratka, osigurava protjecanje električne energije i ujedno uklanja manji dio materijala površine obratka. U pravilu se elektrolit sastoji od natrij-dušičnog oksida ( $\text{NaNO}_3$ ) i drugih aditiva, s time da je uporaba otopine klasične kuhinjske soli ( $\text{NaCl}$ ) vrlo rijetka zbog njene visoke korozivnosti, pa se koristi samo u slučajevima teškoobradivih materijala.

Prema [17], vrlo je važno pravilno postaviti sapnicu kroz koju teče neprekinuti mlaz elektrolita jer se time osigurava preciznost obrade. Također, protok elektrolita mora biti pravilno doziran zbog ostvarivanja protjecanja električne energije. Međutim, preveliki protok elektrolita može uzrokovati uklanjanje metala izvan područja željene obrade što se treba izbjegavati. Pravilnim odabirom elektrolita spriječeno je trganje abrazivnog sredstva brusne ploče.

Prema slici 24 vidljivo je da je „+“ pol istosmjernog izvora električne energije spojen na oslonac koji drži obradak, dok je „-“ pol spojen na glavno vreteno. Čim se mehanički ukloni sloj metalnog oksida koji se nalazi na površini obratka, brus djeluje kao katoda i otapa materijal anode. Mlaznica neprekinuto osigurava tok elektrolita koji zatvara strujni krug između elektroda, pri tome i sam uklanjajući dio materijala. Na pozitivnoj elektrodi dolazi do procesa oksidacija na obratku zbog čega se odvija otapanje sloja metala, te nastanka tankog filma metalnog oksida. Film je u ulozi izolatora i predstavlja barijeru daljnjem djelovanju elektrokemijske reakcije pa ga je nužno ukloniti mehanički, abrazivnim česticama od kojih je sastavljen vodljivi brus. Brus je u većini slučajeva u kontaktu sa dijelom površine obratka koji se obrađuje, ali opterećenja brusa ovisna su o mnogo faktora.

Omjer mehaničkog brušenja i elektrokemijske obrade u potpunosti je prilagodljiv parametrima sustava u cilju postignuća najbolje moguće kvalitete obrade.



Slika 24. Elektrokemijsko brušenje [17]

Nekoliko je parametara koji su iznimno važni za ostvarivanje svih prednosti elektrokemijskog brušenja, a prema [17] to su: napon, vrsta brusa, posmak i protok elektrolita o kojem je već bilo riječi.

Prenizak napon rezultirat će manjim udjelom elektrokemijske obrade i većim udjelom abrazivne obrade uz minimalno glađenje, dok će viši napon imati obratni efekt; više elektrokemijske reakcije, a manje mehaničkog odvajanja čestice. Prevelik napon može uzrokovati električna iskrenja, te isto tako i opasnost električnog udara za operatera stroja. Ispravno projektiran izvor istosmjernog napona od iznimne je važnosti za osiguravanje sigurne, precizne i dobre završne obrade površine obratka.

Posmična brzina kod ECG-a približno je jednaka posmičnoj brzini kod dubokog brušenja, te iznosi od 13 mm do 100 mm po minuti ovisno o veličini obrađene površine. Ukoliko se posmična brzina poveća, povećat će se i udio abrazivne obrade u postupku.

Postoje razne vrste bruseva koji se upotrebljavaju u elektrokemijskom brušenju, ali svi imaju jednu zajedničku karakteristiku: moraju biti elektrovodljivi. Standardna ECG ploča proizvedena je od aluminijevog oksida kao abrazivom i vezivom od smole u koje je dodan bakar kako bi se povećala vodljivost brusa. Takva brusna ploča je elektrovodljiva, ekonomična, vrlo lako obradiva i omogućava vrlo dobru obradu bez pojave srha. Vijek trajanja brusne ploče iznimno je dobar, te u većini slučajeva je duži od 30 do 50 puta od brusne ploče korištene pri dubokom brušenju. Trošenje alata je vrlo nisko, pa profiliranje rezne površine alata je svedeno na minimum, pri čemu je važno naglasiti da se brusne ploče za elektrokemijski postupak mogu profilirati za vrlo složene oblike brušenja.

Elektrokemijskim brušenjem obradivi su svi materijali koji provode električnu energiju i u tu skupinu spadaju: čelik, aluminij, bakar, nehrđajući čelik, berilij, nikal, titan, legure na bazi kobalta i mnogi drugi.

Strojevi elektrokemijske obrade moraju biti kruti kako bi se osiguralo postizanje uskih tolerancijskih rezultata, ali zbog većinskog udjela elektrokemijske obrade u usporedbi sa klasičnim brušenjem strojevi nisu masivni.

Tolerancije koje se mogu ostvariti ovise o materijalu koji se obrađuje i dubinama obrade. Pri malim dubinama uz pažljivu kontrolu parametara brušenja moguće je postići i do 0,005 mm. [19]

Elektrokemijsko brušenje nakon obrade ne ostavlja tipično sjajnu površinu obratka, razlog tomu je nepostojanje mazanja metala kao kod klasičnih postupaka, ali katkad je isplativije odabrati precizniju obrađenu površinu nego sjaj.

Uporabom elektrokemijskog brušenja faktor proizvodnosti direktno je proporcionalan protjecanju električne energije između točke kontakta brusne ploče i obratka. Obradivost materijala ne ovisi o čvrstoći ili tvrdoći materijala već o njegovoj vodljivosti i elektrokemijskoj reaktivnosti.

Slikom 25 prikazana je razlika u kvaliteti između klasičnog brušenja i elektrokemijskog brušenja.

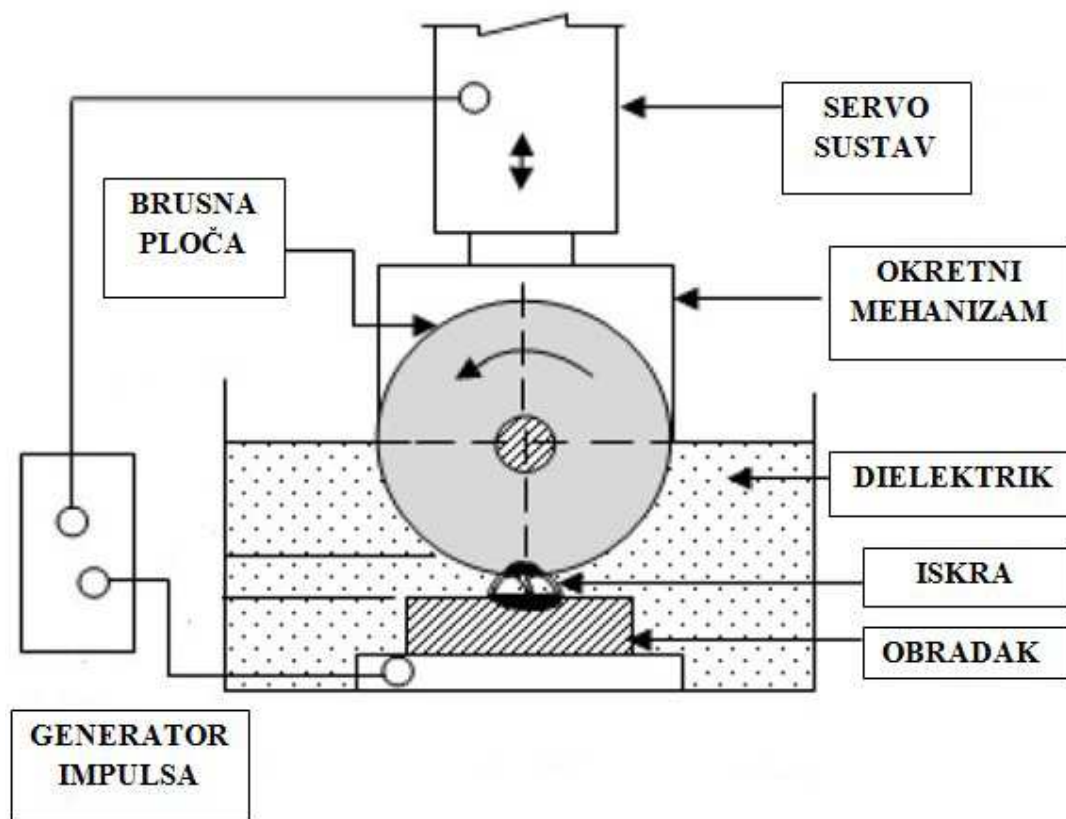


Slika 25. Obradak obrađen klasičnim brušenjem i ECG-om [19]

### 3.7 ELEKTROEROZIJSKO BRUŠENJE

Elektroerozijsko brušenje, poznatije pod engleskim nazivom „Electrical Discharge Grinding“, skraćeno „EDG“, je termički postupak obrade koji se upotrebljava za obradu krhkih, vodljivih, teškoobradivih materijala. Prema principu rada vrlo sličan postupku elektroerozijske obrade jer se materijal uklanja taljenjem i isparavanjem. Razlika je u vrsti elektrode, statička elektroda elektroerozijske obrade zamijenjena je elektrodom koja rotira, točnije elektrovodljivom brusnom pločom.

U postupku obrade ne postoji kontakt između obratka i brusa osim u trenutku elektroerozije. Rotacijom elektrovodljive brusne ploče se poboljšava učinkovitost ispiranja.



Slika 26. Prikaz elektroerozijskog postupka brušenja [26]

Elektrovodljivi metalni brus bez abrazivnih čestica rotira se oko svoje horizontalne osi. U postupku se stvara iskra između rotirajućeg brusa (katode) i obratka (anode), te dolazi do taljenja i isparavanja materijala obratka. Uklanjanje materijala obratka vrši se elektroerozijom, dok se ispiranje odvija pomoću rotacije brusne ploče. Glavni segmenti elektroerozijskog postupka prikazani su slikom 26.



Brus i obradak duboko su uronjeni u dielektričnu tekućinu prilikom obrade. Dielektrična tekućina je u većini slučajeva kerozin, transformacijsko ulje ili deionizirana voda. Glavna uloga dielektrika je osiguranje vodljivog kanala uslijed ionizacije pri uporabi pogodnog probojnog napona.

Servo mehanizam ima vrlo važnu ulogu osiguranja neprekinutog razmaka između obratka i brusa i to u području između 0,013 i 0,075 mm. [20]

Generator impulsa održava parametre impulsa istosmjerne električne energije u određenim dozvoljenim područjima koja su: napon između 40 i 80 V, struja između 0,5 i 200 A, te frekvencija između 50 i 250 kHz-a, točnije iskri po sekundi. [29]

Pri uporabi generatora impulsa, uslijed ionizacije, te udaranja iona i elektrona u elektrode, iskra zauzima mjesto u prostoru najmanjeg razmaka između obratka i brusa. Također, pri pojavi iskre stvaraju se temperature između 8 000 °C i 12 000 °C, dok mogu postići temperaturni maksimum od čak 20 000 °C.

Brus pri elektroerozivnom postupku obrade je elektrovodljiv, proizveden u većini slučajeva od grafita ili dodatno od bakra, mjedi ili mekog čelika. Uslijed visoke otpornosti na trošenje, pojava trošenja je najmanja pri uporabi mekih čelika u usporedbi sa bakrom i mjedi.

Poboljšanjem ispiranja, povećava se i završna obrada površine obratka u usporedbi sa klasičnom elektroerozijskom obradom. Pri istim parametrima elektroerozijsko brušenje osigurava bolje rezultate obrade nego elektroerozijska obrada, a u usporedbi sa klasičnim brušenjem postupak obrade teškoobradljivih materijala brži je 2 do 3 puta.

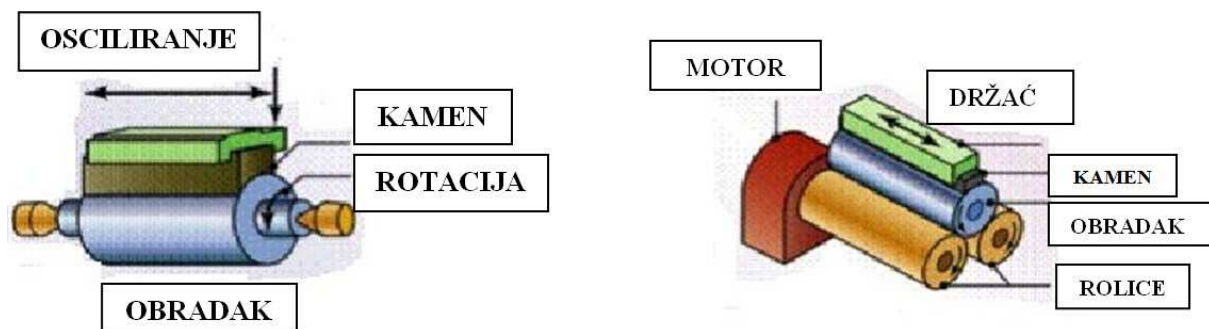
Veće brzine rotacije brusa ne moraju uvijek biti prednost postupka, tako pri elektroerozijskom brušenju veće brzine uzrokuju nestabilnu iskru što štetno utječe na karakteristike postupka. Pošto nema fizičkog kontakta između obratka i elektrovodljive brusne ploče postupkom se mogu obrađivati vrlo tanki, krhki elektrovodljivi materijali.

## 4 SUPERFINIŠ

Superfinaš je postupak završne obrade za vanjske rotacijske, konusne, kuglaste površine pri kojemu se dobije najviša kvaliteta obrađene površine u području od N1 do N3. Također povećava se nošenje površine jer se superfinašem skidaju samo vrhovi neravnina koji su prethodno pripremljeni brušenjem. Superfinaš se još naziva i kratkohodnim honanjem, mikrofinašem ili titrajućim glačanjem.

Postupak je izumljen 1934. godine u Chrysler Corporation, ali je trebalo punih 40 godina kako bi postupak ušao u širu primjenu kakva je danas poznata.

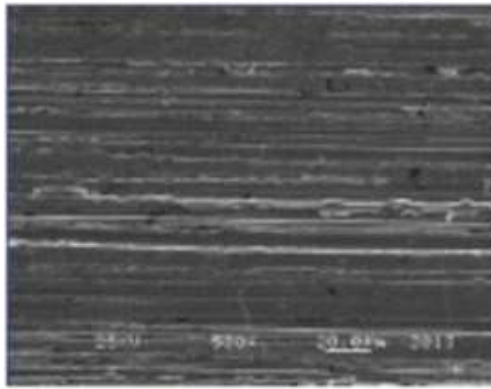
Sam postupak obrade vrši se oscilatornim gibanjem kamena u smjeru osi obrađene površine frekvencijama od 200 do 3 000 duplih hodova u minuti u amplitudi osciliranja od 1 od 6 mm. Navedeno oscilacijsko gibanje alata je glavno gibanje, dok se posmično gibanje vrši sam obradak i to pri malim posmičnim brzinama od 10 do 50 m/min. [21]



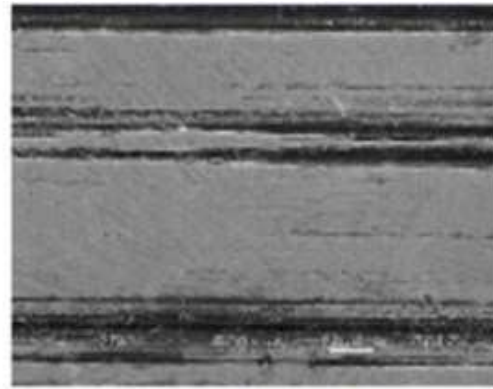
Slika 27. Postupak obrade superfinašem [27]

Alat koji se koristi prilikom postupka superfinaša sličan je alatu za brušenje. Veličina abrazivnih zrna uvjetovana su ciljanom kvalitetom obrađene površine pa se najčešće koriste vrlo fina zrna. Također, kako bi se omogućila vrlo fina obrada koju superfinaš omogućava, struktura kamena mora biti otvorena što osigurava bolje primanje odstranjene čestice i viši stupanj kvalitete obrađene površine. Vrste abraziva koje se upotrebljavaju pri superfinaš obradi iste su kao i kod brušenja: aluminijski oksid, silicij karbid, te CBN i dijamant, s time da se još može upotrijebiti i grafit. [26]

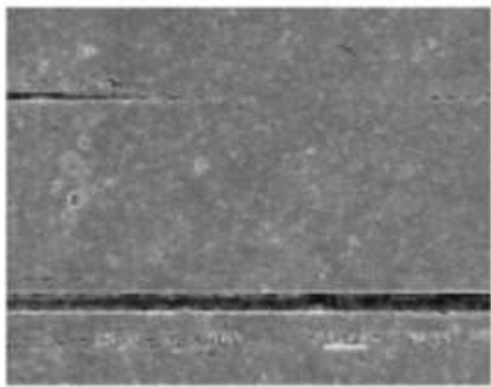
Abrazivna zrnca su vezana keramičkim vezivima. Karakteristike keramičkih veziva izvrsne su kod automatiziranih procesa, te zbog mogućnosti samooštrenja, nije potrebno zaustavljati proces proizvodnje što osigurava veći stupanj proizvodnosti postupka.



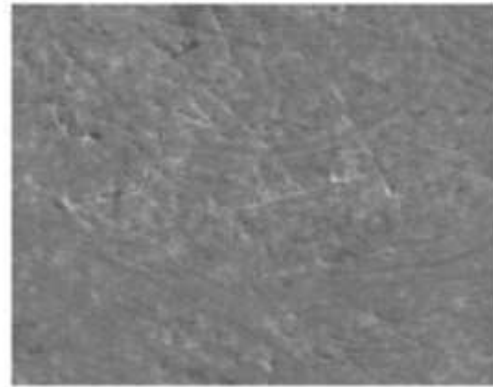
**OSNOVNO**



**DOBRO STANJE POVRŠINE**

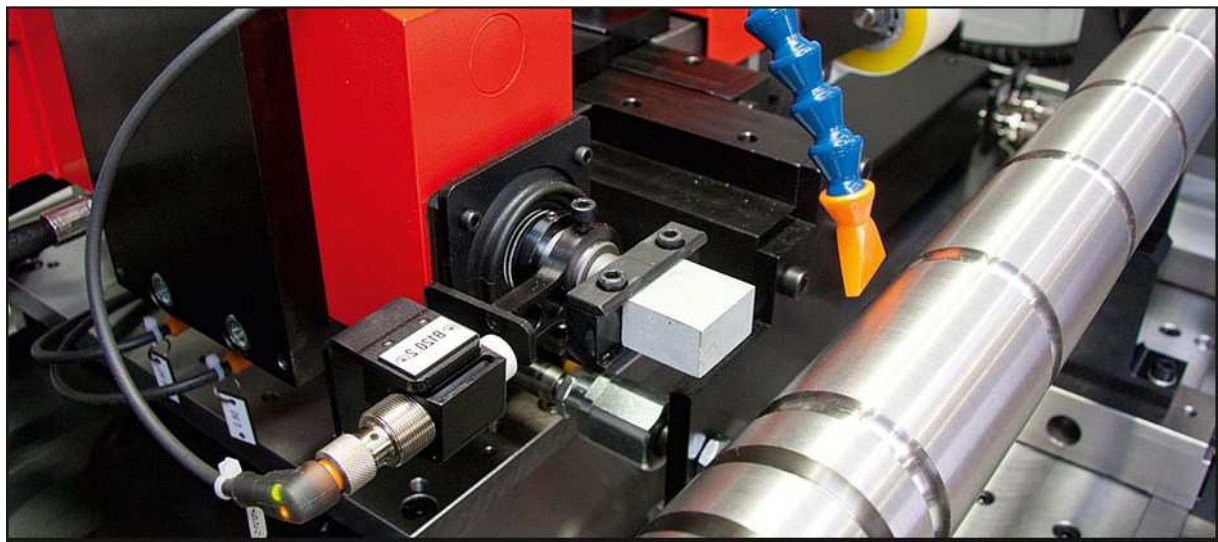


**BOLJE**



**NAJBOLJE**

Slika 28. Izgled površine nakon obrade superfinišem [21]



Slika 29. Superfiniš [25]

Za postizanje ciljane kvalitete obrade potrebno je vršiti ispiranje petrolejom ili smjesom mineralnih ulja i petroleja.

Superfinaš u današnjoj industriji ima široku primjenu pa se tako postupak može upotrebljavati kod obrade dijelova automobilskih osovina, dijelova automobilskih motora, kod dizelskih motora, hidraulike, ležajeva i u medicinskim svrhama pri obradi implantanta.

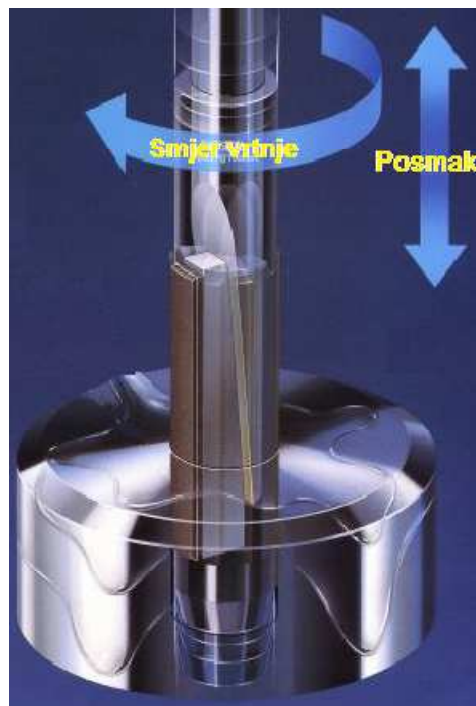
Glavne prednosti superfinaša odnose se na: produljenje vijeka trajanja obratka, smanjenje trošenja, uže tolerancije, poboljšanje kapaciteta brtvljenja, smanjenje potrošnje energije.

## 5 HONANJE

Honanje je postupak fine završne obrade koji se izvodi pomoću alata s geometrijski nedefiniranom oštricom, te se najčešće upotrebljava pri obradi unutarnjih cilindričnih površina. Obrada je ostvarena rotacijom i translacijom alata dok obradak miruje, a odvajanja čestice se odvija pri obodnom brzinama nižim nego pri brušenju.

Također, honanjem se može ostvariti kvaliteta hrapavosti obrađene površine (N2 do N5), dodatak za obradu kreće se od 0,03 mm do 0,05 mm, a u pravilu se honanjem mogu obraditi obratci unutarnjeg promjera od 1,5 mm do 150 mm. Duljina posmaka za manje strojeve iznosi od 10 do 200 mm, dok za veće strojeve može doseći i do 600 mm. Specijalnim strojevima se može honati i promjere preko 1 200 mm sa posmičnom duljinom od 3 500 mm. [21]

Alat kojim se postupak obrade vrši, glava za honanje, sastoji se od abrazivnih zrnaca i njegovom rotacijom i translacijom abrazivna zrnca uklanjaju materijal sa unutarnjeg promjera obratka. Prilikom obrade svi radni dijelovi alata (brusno kamenje) nalaze se u zahvatu, te su stalno pritisnuti uz stjenku obratka određenim tlakom i mogu se širiti. Specifični tlak kod kamena iznosi od 4 do 7 bara kod grube obrade i od 3 do 4 bara kod fine obrade. Temperature koje se razvijaju prilikom obrade su niske, u rasponu od 50 do 150 °C.



Slika 30. Izgled i smjer gibanja alata pri honanju [21]

Glave za honanje se sastoje od dva dijela, trupa alata i radnog dijela. Radni dio alata čini brusni kamen za honanje koji može biti spojen elastično ili kruto za trup alata.



Slika 31. Primjer kruto i elastično spojenih segmenta za honanje na trup alata [21]

Abrazivni materijal za honanje mora biti odabran prema nekoliko kriterija: strukturi i vrsti veze, tvrdoći kamena za honanje, vrsti honanja, području primjene, te veličini zrna kojom će biti moguće postići najveću brzinu odstranjivanja čestice uz postizanje razreda kvalitete obrađene površine.

Vrstu abraziva biramo prema kompoziciji materijala koji se obrađuje. Postoje razne vrste abraziva, ali za honanje najčešće koristimo: aluminijski oksid, silicij karbid, dijamant i CBN.

Kako bi odabir abrazivnog sredstva bio što jednostavniji, važno je obratiti pažnju na namjenu materijala, pa tako dijamant i CBN su superabrazivi koji su puno tvrdi nego klasični abrazivi. Alat proizveden sa superabrazivima obrađuje vrlo lako, sporije se zatupljuje i omogućava honanje određenih materijala puno brže i efikasnije od klasičnih abraziva.

Međutim, superabrazivi nisu pogodni za obradu svih materijala, tako alat s dijamantom kao abrazivom ne može dobro obraditi čelik, a alat s CBN-om kao abrazivom zbog visokog troška proizvodnje je manje isplativ za obradu mekih čelika u usporedbi s alatom proizvedenim od aluminijskog oksida.

Keramičko vezivo ili vezivo od smole za alat proizveden s dijamant i CBN zrnima zbog karakteristika upotrjebljenih zrnaca mora biti dovoljno čvrsto kako bi izdržalo postupak obrade. Metalne veze najpogodnije su za primjenu zato što se zrnca drže u sintetiziranoj metalnoj matrici koja je puno izdržljivija od klasičnih veza. Odabir abraziva i čvrstoće veziva mora biti u skladu sa područjem primjene, količini uklonjene čestice i vijeku trajanja alata.

Nadalje, pri izboru materijala za alat katalogi proizvođača su od velike pomoći jer jednostavnim uputama i primjerima mogu olakšati izbor. Ukoliko kamen ne vrši dobru obradu treba odabrati mekaniji kamen, a ako se kamen prebrzo troši tada u obzir dolazi odabir tvrdog kamena.

Veličina zrna abraziva mora se odabrati tako da je istim moguće postići ciljanu kvalitetu površinske obrade. Kvaliteta obrade površine je funkcija visine mikroskopskih vrhova i dolova obrađene površine. [22] Honanjem se može ostvariti vrlo širok stupanj glatkoće obrađene površine ovisno o vrsti zrnca koje se upotrebljava.



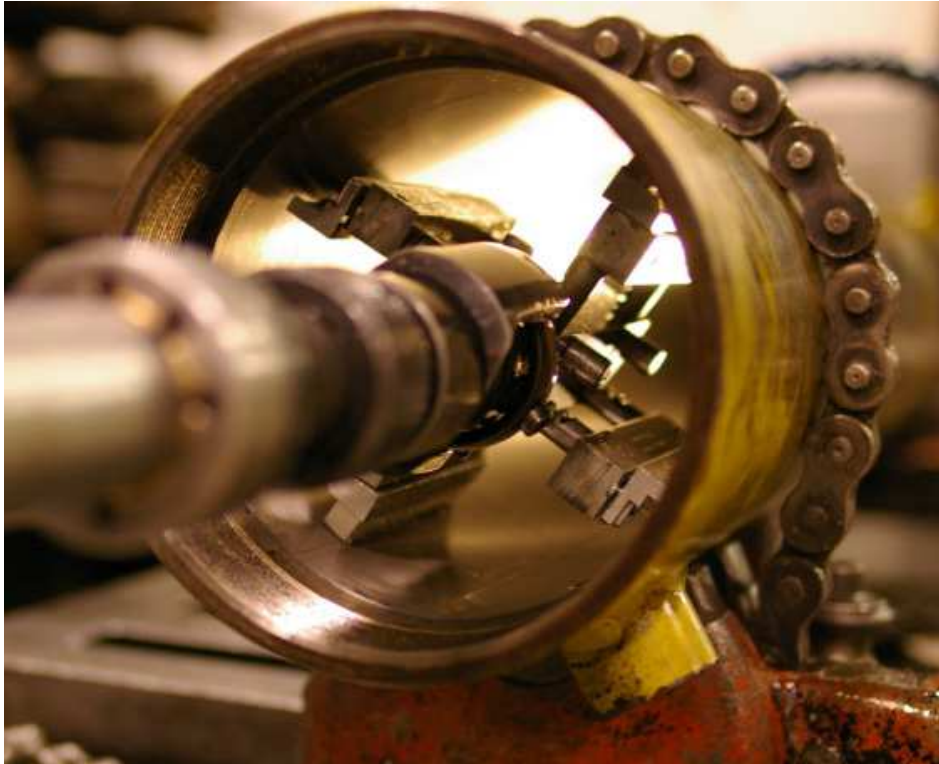
Slika 32. Segmenti (kamenje) za honanje [21]

Lubrikanti su vrlo važni jer smanjuju toplinu prilikom obrade, te onemogućuju da se odvojene čestice zalijepu za abrazive. Postoje dvije vrste lubrikanta, lubrikanti s uljnom osnovom ili lubrikanti na bazi vode. U pravilu se koriste rijetka ulja, petrolej ili smjesa mineralnog ulja i petroleja koja se upotrebljavaju pri obradi aluminijskih ili nehrđajućih čelika.

Međutim, zbog ekološke osviještenosti u zadnje vrijeme povećala se uporaba lubrikanata na vodenoj bazi.

Strojevi za honanje mogu biti vertikalne ili horizontalne izvedbe. Za duže obratke se upotrebljavaju horizontalne zbog veće praktičnosti, dok se vertikalne upotrebljavaju za kraće, ali teže obratke.

Honanje se u pravilu može primijeniti na sve površine, ali se najčešće upotrebljava za ostvarivanje preciznih dimenzija i kvalitetnih površina kod cilindričnih oblika s velikim rasponom promjera kao kod hidrauličkih cilindara, klipova, provrta ležaja.



Slika 33. Honanje hidrauličkog cilindra [21]



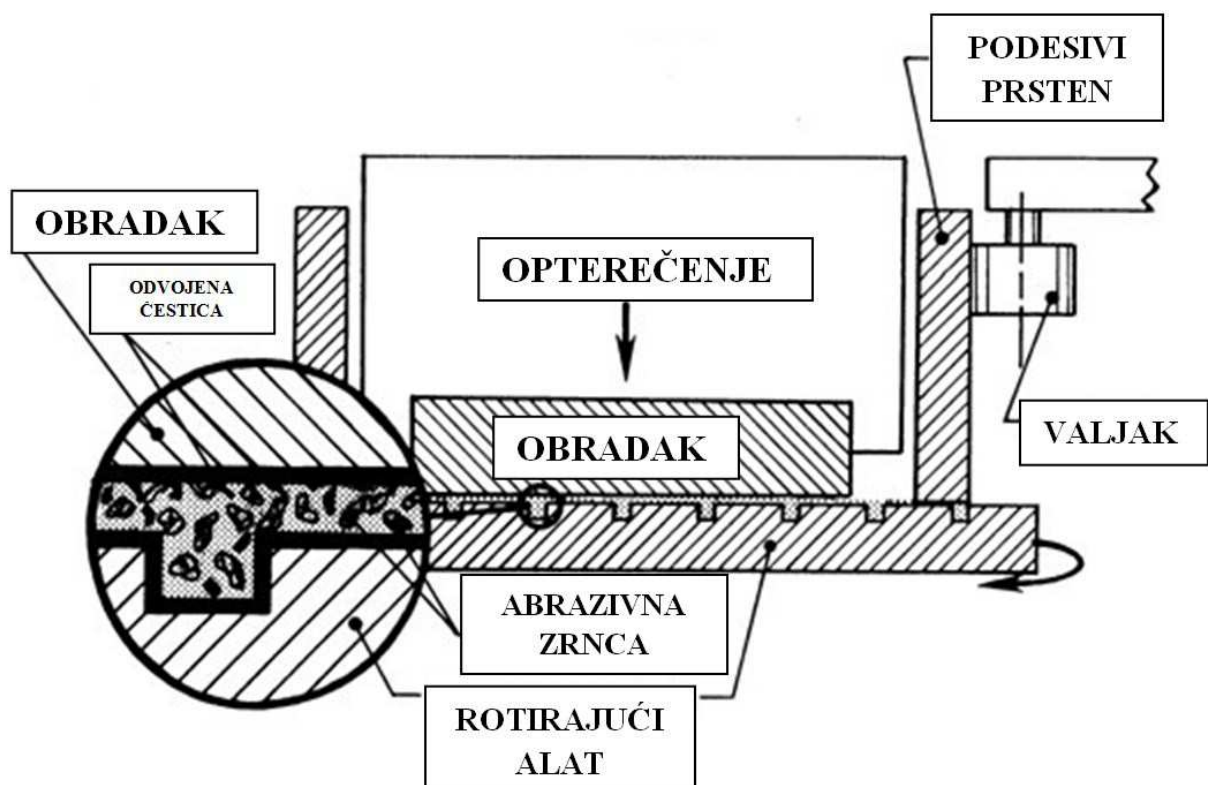
Slika 34. Površina košuljice cilindra prije i poslije honanja [23]



## 6 LEPANJE

Lepanje je superfini postupak završne obrade koji se izvodi pomoću rahlog alata, točnije slobodnim abrazivnim zrcima koja se nalaze u pasti ili tekućini. Obrada lepanjem osigurava iznimno visoke dimenzijske preciznosti, ispravlja vrlo male površinske nesavršenosti, te daje visoku kvalitetu i nosivost lepanoj površini. Moguće je postići izrazit stupanj hrapavosti površine u klasama između N1 i N5 s vrlo malim odstupanjima od 0,1 do 0,5  $\mu\text{m}$  [21], te se najviše koristi kod ravnih i glatkih površina.

Pri lepanju alat i obradak se rotiraju jedan preko drugog uz prisustvo sredstva za lepanje. Upravo sredstvo za lepanje je komponenta koja vrši obradu. Naime, zbog abrazivnih čestica od kojih se sastoji sredstvo za lepanja, vrši se odvajanje čestica s površine obratka. Obradak je prethodno obrađen na približno završnu mjeru, kreće se slobodno, točnije klizi, te se nalazi u gnijezdu separatora ili u podesivim prstenima. Sama rotacija podesivih prstena omogućuje ravnomjerno trošenje ploče za lepanje i drži obradak na mjestu. Također, mora postojati dodatak za obradu koji iznosi od 0,005 do 0,02 mm.



Slika 35. Postupak lepanja [24]

Strojevi na kojima se izvodi obrada lepanjem su vrlo jednostavni i sastoje se od rotirajućeg stola sa tri ili četiri podesiva prstena (gnijezda) u koji se stavlja obradak. Ploče za lepanje kod klasičnih strojeva su promjera od 300 do 1 200 mm, dok kod velikih strojeva ploče mogu biti i do 3 500 mm promjera. Elektromotori koji pogone ploče za lepanje snage su od 750 do 15 000 W. [22]



Slika 36. Ploča s gnijezdima za prihvat obradaka pri lepanju [21]

Ploče za lepanje moraju biti savršeno ravne i u pravilu su proizvedene od visokokvalitetnog lijevanog čelika, a ostali materijali koje se mogu koristiti su: bakar i legure od bakra, meki čelik, olovo.

Također, ploča za lepanje mora biti mekša ili iste tvrdoće kao i obradak koji se obrađuje lepanjem kako se abrazivna zrnca ne bi zabijala u obradak i na taj način smanjila kvalitetu obrađene površine.

Ploče na sebi mogu imati utore raznih geometrijskih smjerova, kao što je prikazano slikom 37.



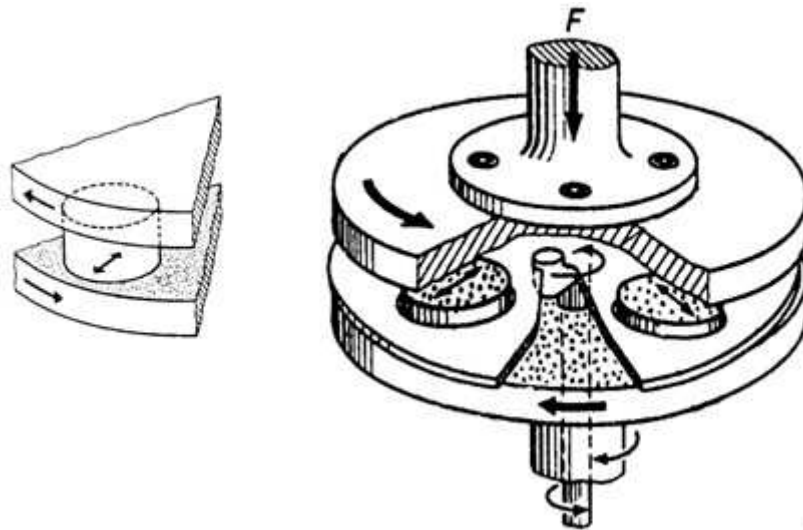
Slika 37. Ploče za lepanje sa različitim utorima [21]

Veličina abrazivnih zrnaca uvjetovana je vrstom obrade. Tako će se pri grubom lepanju koristiti abrazivna zrnca veće veličine, a kod finog lepanja suprotno. Uporabom superabrazivnih zrnaca, posebice dijamantnih zrnaca povećava iskoristivost postupka zbog toga što je obrada brža, čišća i ekonomičnija. Pri uporabi dijamantnih zrnaca postupak lepanja i poliranja se mogu smatrati kao jedan, te uz kraće vrijeme čišćenja obratka i otpada nastalih obradom, povećava se proizvodnost postupka obrade.

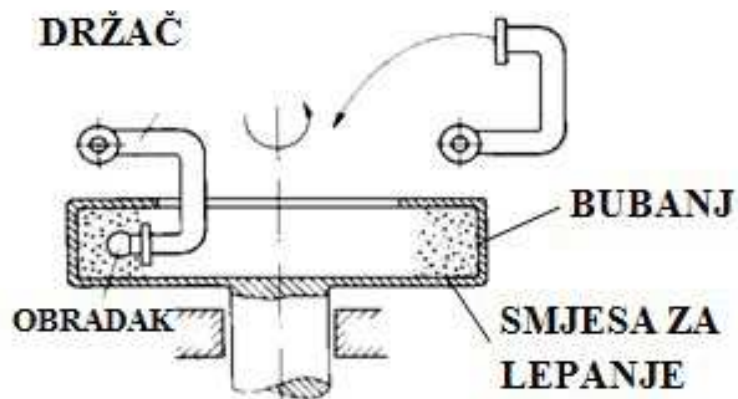
Postupak obrade lepanjem može se izvoditi ručno ili strojno, te postoje 4 poznate vrste lepanja:

- prisilno lepanje,
- lepanje uranjanjem,
- lepanje mlazom,
- lepanjem glađenjem (poliranje).

Slikom 38 prikazan je postupak prisilnog lepanja. Pri prisilnom lepanju koriste se dvije ploče za lepanje. Donja ploča, u pravilu, na sebi ima utore u koje se umeću obratci, dok se gornjom pločom vrši pritisak na donju ploču. Između ploča nanosi se sloj sredstva za lepanje. Obrada se ostvaruje rotacijom obje ploče uz prisustvo dovoljnog pritiska u cilju ostvarivanja kontakta između sudionika u obradi.

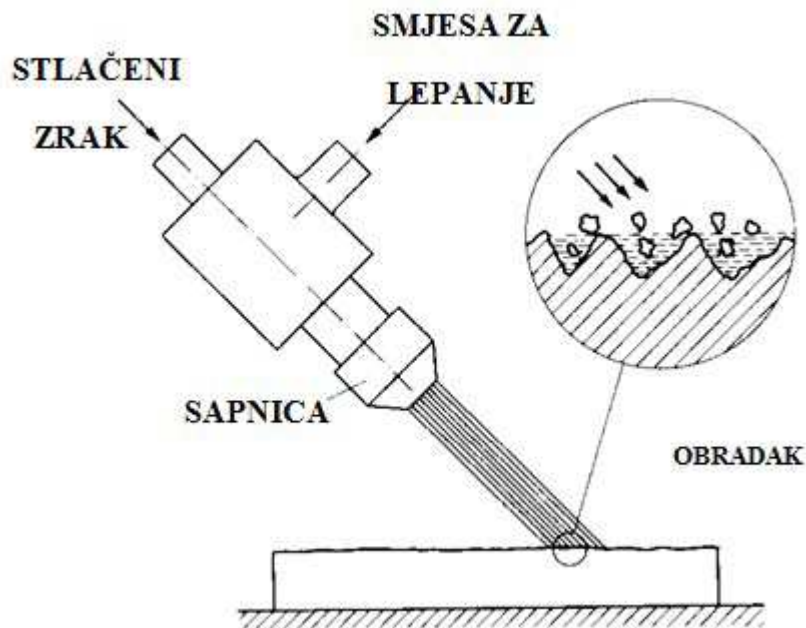


Slika 38. Prisilno lepanje [28]



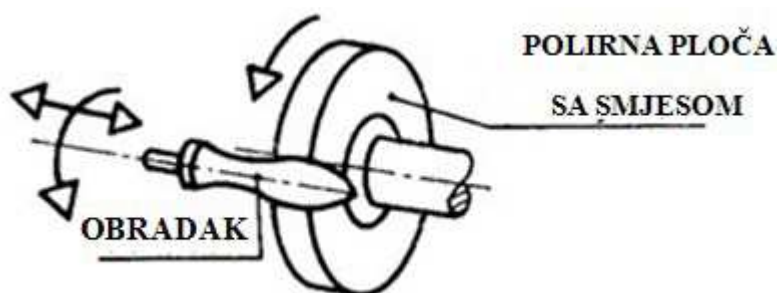
Slika 39. Lepanje uranjanjem [28]

Slikom 39 prikaz je postupak lepanja uranjanjem pri kojem se obradak po potrebi uranja u bubanj koji rotira.



Slika 40. Lepanje mlazom [28]

Lepanjem mlazom vrši se vrlo fino tretiranje površine obratka uporabom stlačenog zraka u kombinaciji sa smjesom za lepanje koja kroz mlaznicu udara u površinu obratka. Usmjerenim mlazom omogućava se odstranjivanje čestica površine obratka, posebno dugih, te se na taj način vrši obrada kao što je prikazano slikom 40.



Slika 41. Lepanjem glađenjem (poliranje) [28]

Lepanje glađenjem, poznato još kao i poliranje, je obrada koja se ostvaruje rotacijom polirne ploče na koju je nanesen sloj smjese za lepanjem te rotacijom i translacijom obratka koji se obrađuje, kako je vidljivo slikom 41.

Lepanje je postupak koji vremenski ne traje dugo. Karakterističan je po vrlo niskim tlakovima i brzinama obrade. Najveća je prednost mogućnost obrade svih vrsta materijala, bez obzira radi li se o metalu ili nemetalu. Jedini uvjet je da površina obratka bude ravna.

Nadalje, prilikom obrade ne dolazi do deformiranja obratka jer nema stezanja steznim napravama, te se razvija vrlo malo topline. Lepanjem se u potpunosti uklanja srh. Mogu se obrađivati obraci svih veličina, promjena i debljine od tisućinke milimetra pa do visine stroja na kojem se obrada vrši.

Nažalost, lepanje se smatra vještinom i zbog mnogo utjecajnih i promjenjivih ulaznih parametara vrlo je teško osigurati dosljednost dobivanja traženih rezultata obrade. Kako bi se osigurali optimalni rezultati potrebno je mnogo iskustva i prakse.



Slika 42. Stroj za lepanje s četiri gnijezda za obratke [21]



Slika 43. Stroj za lepanje sa šest gnjezda za obratke [21]

## 7 ZAKLJUČAK

Sadašnji trend napretka tehnologija primarno je uzrokovan grubim i katkad nekorektnim tržišnim utakmicama. No, bez obzira na uzroke vanjskih parametara tržišta, nedvojbeno je da je u zadnjih pedesetak godina tehnologija obrade odvajanjem čestice s nedefiniranom reznom oštricom iznimno uznapredovala, a istražuje se i razvija i dalje.

Neki postupci obrade odvajanjem čestice nastali su sasvim slučajno ili kao rezultat neuspjelog eksperimentiranja nečeg sasvim drugo planiranog. Razvoj drugih postupaka je bio rezultat industrijske potrebe za ostvarivanjem boljih rezultata, većeg vijeka trajanja alata ili uštede na vremenu i novcu.

Ako se napravi samo kratki osvrt s početnom točkom u sredini prošlog stoljeća, moguće je uočiti efekt spontanog tehnološkog razvoja uvjetovanog razvojem samog društva u cjelini. Tako se primjerice, preokret u percepciji brušenja dogodio pedesetih godina prošlog stoljeća kada je Edmund Lang sa sinom Gerhandom pomoću neuspjelog eksperimenta elektrokemijskog brušenja otkrio postupak dubokog brušenja. Tim otkrićem brušenje je dobilo na značaju, te je postalo izravna konkurencija postupcima obrade poput glodanja, tokarenja i provlačenja.

Daljnji tijek razvoja brušenja primarno je fokusiran na povećanje proizvodnosti već postojećih postupaka brušenja u svim mogućim parametrima poput: kraćeg vremena obrade, povećanja obodnih brzina alata, uvođenje kontinuiranog profiliranja rezne oštrice u cilju poboljšanja njenih karakteristika i općenito povećanje kvalitete obrađene površine obratka. Tako danas postoje duboko brušenje, brušenje s kontinuiranim profiliranjem, duboko brušenje sa kontinuiranim profiliranjem, elektrokemijsko brušenje i elektroerozijsko brušenje.

Također, kroz povijest je vidljivo da su promjene brzine obrade odigrale značajnu ulogu, posebice povećanje obodnih brzina brusa, što je rezultiralo razvojem visokobrzinskog brušenja sa PCD i CBN brusevima i visokoučinskog brušenja.

Ostali postupci završne obrade odvajanjem čestica s nedefiniranom oštricom, pri tome misleći na superfiniš, honanje i lepanje, imali su također svoj put kroz povijest.



Neki su poznati skoro od vremena izuma vatre, a drugi pak pedesetih godina prošlog stoljeća, čekajući svoj trenutak tehnološke potpore kako bi danas omogućili najbolje moguće karakteristike obrađene površine.

Napredak cijele grupe završnih postupaka obrade dijelova leži u međusobnom povezivanju postupaka pri tome iskorištavajući pozitivne karakteristike svih sudionika, te njihovog povezivanja u cilju ostvarenja boljih rezultata.

Razvoj novih materijala brusnih ploča esencijalan je za boljitak tehnoloških karakteristika i usko je povezan uz rezultate obrade brušenjem. Primjera radi, obećavajuće područje novih materijala čine sintetički materijali. Novo razvijena mikrokristalična brusna zrna od aluminijevog oksida, poznata pod nazivom „Seeded Gel“, povećane su tvrdoće i žilavosti, a u kombinaciji s određenim postotkom klasičnih zrna čine nove i znatno bolje takozvane SG brusne ploče.

Do sada, postupci završne obrade dijelova pokazali su koliko mogu biti utjecajni u dinamičnom industrijskom razvoju, ali pravi izazovi za njih tek dolaze razvojem ljudskih djelatnosti koje se trenutno čine kao ekstremni pothvati. To su prvenstveno svemirske tehnologije i razvoj novih materijala, a mjesto odvijanja tih pothvata vjerojatno neće biti na planeti Zemlji nego negdje u Svemiru.

## 8 LITERATURA

- [1] Udiljak, T., Ciglar, D., Škorić, S., Staroveški, T. & Mulc, T., Suvremeni obradni sustavi i tehnologije // Proceedings of 1st International Conference "Vallis Aurea " / Katalinić, Branko (ur.), Požega, 19.rujna 2008, pp. 0975-0979
- [2] Ciglar, D., Udiljak, T., Mulc, T., Staroveški, T., Suvremeni alatni strojevi i njihovi moduli // Proceedings of 3rd International Conference "Vallis Aurea " // Katalinić, Branko (ur.), Požega, 05.10.2012., p. 0177-0181.
- [3] A. Pavić: „Obrada odvajanjem čestica“, udžbenik, Karlovac, veljača 2007.
- [4] D. Ciglar: Podloge s predavanja kolegija „Obradni strojevi“, Osnove brušenja, Karlovac 2012.
- [5] S.C. Salamon: „What is abrasive machining?“, članak izdan u časopisu „*Manufacturing Engineering*“, veljača 2010.
- [6] P.K. Gibree, „Three Faces of Creep-Feed Grinding “ [www.abrasive-form.com/documents/Three%20Faces%20of%20Creep-Feed%20Grinding.pdf](http://www.abrasive-form.com/documents/Three%20Faces%20of%20Creep-Feed%20Grinding.pdf), pristupio 10. ožujka 2015.
- [7] R. Cebalo: Duboko brušenje, Školska knjiga Zagreb, 1990.
- [8] B. Donohue, „How it Works – Don't Call it „Grinding“, članak izdan u časopisu „*Today's Machining World Archives*“, Volume 07, Issue 02, ožujak 2011.
- [9] D. Ciglar: Podloge s predavanja kolegija „Obradni strojevi“, Suvremeni postupci brušenja, Karlovac 2012.
- [10] Video prezentacija stoji: „MÄGERLE MFP 50 Vane Grinding Application“, <https://www.youtube.com/watch?v=T-hAKUIPry8>, pristupio 15. ožujka 2015.
- [11] Webinar: Discover A New Grinding Solution For Difficult-To-Machine Workpieces, [https://www.youtube.com/watch?v=ESmswh\\_Hxwk](https://www.youtube.com/watch?v=ESmswh_Hxwk), pristupio 15. ožujka 2015.
- [12] Anonymus „CDCF Grinding Regains Aerospace Nod“, časopis *Manufacturing Engineering*, <http://www.sme.org/MEMagazine/Article.aspx?id=67669&taxid=1443>, pristupio 16. ožujka 2015.

- [13] Norton: Diamond And Cbn Superabrasives, Standard Product Catalog, <http://www.nortonindustrial.com/Diamond-CBN-Superabrasives.aspx>, pristupio 17. ožujka 2015.
- [14] Dijamanski i CBN-alati, katalog, www. <http://antvelsgroup.rs/katalozi>, pristupio 17. ožujka 2015.
- [15] Vossloh Rail Services, [http://www.vossloh-rail-services.com/en/products\\_services/high\\_speed\\_grinding/high\\_speed\\_grinding.html](http://www.vossloh-rail-services.com/en/products_services/high_speed_grinding/high_speed_grinding.html), pristupio 20. ožujka 2015.
- [16] Iopscience: "Process monitoring in high efficiency deep grinding- HEDG", [http://iopscience.iop.org/1742-6596/76/1/012061/pdf/jpconf7\\_76\\_012061.pdf](http://iopscience.iop.org/1742-6596/76/1/012061/pdf/jpconf7_76_012061.pdf), pristupio 23. ožujka 2015.
- [17] What is Burr Free Grinding, <http://www.tridextech.com/what-is-burr-free-grinding>, pristupio 24. ožujka 2015.
- [18] What is Electrochemical Grinding, <http://www.everite.com/capabilities/burr-free-cutting-machining/what-is-electrochemical-grinding/>, pristupio 24. ožujka 2015.
- [19] Electrochemical Grinding Process Overview, <http://www.everite.com/capabilities/burr-free-cutting-machining/electrochemical-grinding-process-overview/>, pristupio 24. ožujka 2015.
- [20] R.N.Yadav, Yadava V., "Electrical Discharge Grinding (EDG) : A Review, YMCA University of Science & Technology, Faridabad, Haryana, listopad 2012., online pristup <http://ymcaust.ac.in/tame2012/cd/production/P-40.pdf>, pristupio 24. ožujka 2015.
- [21] I. Slade: "Obrada materijala II", <http://moodle.tesla.hr/course/view.php?id=27>, pristupio 28. ožujka 2015.
- [22] G. Schneider: "Cutting Tool Applications, Chapter 18: Lapping and Honing", American Machinist, svibanj 2011., online pristup: <http://americanmachinist.com/machining-cutting/cutting-tool-applications-chapter-18-lapping-and-honing>, pristupio 30. ožujka 2015.

[23] S. Ivic, B. Smoljan, Lj. Pedišic, B. Peric, " Mogućnost primjene nečistih ulja za obradbu metala pri honanju košuljica cilindara", Goriva i maziva, 45, 3: 165-187, 2006.

[24] *Anonymus* : „Flat Lapping“,

[www.cwu.edu/~cattinw/\\_private/Documents/Lapping.doc](http://www.cwu.edu/~cattinw/_private/Documents/Lapping.doc), pristupio 31. ožujka 2015.

[25] Superfinish, <http://www.supfina.com/products/technology/superfinish/> , pristupio 31. ožujka 2015.

[26] The Art of Superfinish, [http://darmann.com/other/The\\_Art\\_of\\_Superfinishing.pdf](http://darmann.com/other/The_Art_of_Superfinishing.pdf), pristupio 31. ožujka 2015.

[27] *Anonymus* , Superfinishing Process,

<http://meen282.et.byu.edu/sites/meen282.et.byu.edu/files/PPT/26->

[AbrasiveMachiningFinishing\\_files/frame.htm](http://meen282.et.byu.edu/sites/meen282.et.byu.edu/files/PPT/26-AbrasiveMachiningFinishing_files/frame.htm) ,pristupio 31. ožujka 2015.

[28] D. Ciglar: Podloge s predavanja kolegija „Obradni strojevi“, Postupci završne obrade, Karlovac 2012

[29] [www.books.google.hr/books](http://www.books.google.hr/books) , Advanced, Machining Processes, pristupio 6. travnja 2015.